

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA DE
INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO MECÁNICO

TEMA:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COCINA SOLAR CON
PROYECCIÓN A UN SISTEMA AUXILIAR DE INDUCCIÓN

AUTOR:
BRYAN GABRIEL PAREDES ESTRELLA

TUTOR:
WILLIAM GIOVANNY QUITIAQUEZ SARZOSA

Quito, agosto 2016

Cesión de derechos del autor

Yo, Bryan Gabriel Paredes Estrella, con documento de identificación N° 1716692585, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “Diseño y construcción de una cocina solar con proyección a un sistema auxiliar de inducción”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado por la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



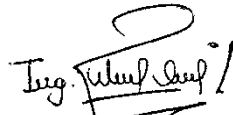
Bryan Gabriel Paredes Estrella

1716692585

Quito, 09 de agosto del 2016

Declaratoria de coautoría del docente tutor

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo en titulación, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COCINAR SOLAR CON PROYECCIÓN A UN SISTEMA AUXILIAR DE INDUCCIÓN realizado por Bryan Gabriel Paredes Estrella, obteniendo un proceso y análisis que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.



Ing. William Giovanni Quitiaquez Sarzosa MSc.

C.C. 1721609764

Quito, 09 de agosto del 2016

Agradecimiento

Un importante reconocimiento a la empresa de Ángel Tonato, Hierros y Metales, quien con su gente, su experiencia y su equipo de trabajo aportaron grandemente en la manufactura de cada una de las piezas, en la construcción del proyecto. Un especial agradecimiento a mi tutor Ing. William Quitiaquez M.Sc. ya que sin su apoyo y consejo no podría haber llegado tan lejos para culminar este proyecto.

Dedicatoria

Primero deseo agradecer a Dios, no por el hecho de obtener el título, pero por permitir que pueda dedicar mi tiempo y mi esfuerzo a lo que más me apasiona que es la ingeniería mecánica y su rama de energía renovables. Agradezco a mis padres Fabián e Isabel y a mi hermano Jacob por su apoyo constante y por estar junto a mí en las horas más difíciles, alentándome para sacar este proyecto adelante. Este proyecto lo dedico a mis abuelos, cuyo aporte ha hecho que en mí pueda crecer la curiosidad como hábito diario y aprender a tener la paciencia necesaria para que las cosas puedan efectuarse, por el bien de una sola idea, de un solo camino. Recordando así, lo que permanece invariable, es decir, la tradición, la familia; el querer aportar con lo mejor para el país.

Resumen

El presente proyecto técnico contempla el diseñar e implementar una cocina solar de geometría parabólica para el área urbana de Quito, Ecuador. El principio de funcionamiento de una cocina solar se puede describir como un intercambiador de calor que transfiere la radiación proveniente de la energía solar para entregar calor a los alimentos, con el propósito de elevar su temperatura y provocar los cambios químicos propios del proceso de cocción. Al utilizar la geometría de un paraboloide toda la radiación que se refleje en la superficie del concentrador converge en un punto llamado foco, en el cual se ubica la olla o recipiente que se desea calentar.

En el capítulo 1 se presenta la información de cómo el interés por esta tecnología ha ido aumentando, también se explica los tipos de cocina existentes y por qué se eligió una de ellas para este proyecto.

En el capítulo 2 se explica cómo la radiación solar se relaciona con la ubicación geográfica y la manera cómo las condiciones climáticas influyen en la eficiencia del dispositivo, también se realiza el análisis térmico del sistema.

En el capítulo 3 se manifiesta la posibilidad de proyectar un sistema de inducción auxiliar para apoyar al dispositivo en condiciones climáticas desfavorables o en la noche. Junto a esto se presenta un análisis de costos y se tiene el análisis de las pruebas efectuadas con diferentes alimentos y en diferentes condiciones climáticas.

Palabras clave: Cocina solar, paraboloide, radiación, eficiencia, inducción.

Abstract

This project was conceived for the purpose of designing and building a solar cooker with a parabolic geometry to be implemented in the city of Quito, Ecuador. The way how this device works is as follows: This solar cooker is a heat exchanger that uses the energy that comes from the sun, then the radiant heat provided by the sun is reflected from the surface of the concentrator to a point called focus, which is the geometric place where all the rays reflected from the concentrator converge. Once the rays reach the focus any object placed on this point gains heat and rises its temperature rapidly, thus a pot placed there with food on the inside will be heated due to the heat transfer laws.

The first chapter presents information on the importance of this kind of device and its growing relevance during the years. Here is explained the solar cooker types and the parameters to choose a unique kind.

In the second chapter, it is explained the dependence of the solar radiation on the geographic location. It is shown the way the weather conditions have a deep implications in the efficiency of the solar cooker. A thermal analysis of the entire system has been made, too. In the third chapter, it is reviewed if an induction system could support the solar cooker under the effect of bad weather conditions or when the hours of daylight are gone. In addition, it is shown a cost analysis. Finally, conclusions and recommendations based on the experiments are available with a pot filled with different ingredients and weather conditions.

Keywords: Solar stove, parabolic, radiation, efficiency, induction.

Índice

Introducción	1
Planteamiento del Problema	1
Objetivos.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos.	3
Capítulo 1	4
1.1 Información general.....	4
Cocina solar	4
1.2 Definición y principio de funcionamiento.....	9
1.3 Clases de cocina solar.....	10
1.3.1 Cocinas con colectores de placa plana.....	11
1.3.2 Cocina tipo caja	11
1.3.3 Cocinas con colectores de concentración	11
1.4 Criterio de selección del tipo de cocina solar tipo parabólica	15
1.4.1 Ubicación geográfica de la cocina	15
1.4.2 Elección del tipo de concentrador.....	17
1.4.3 Análisis de alternativas	20
1.4.4 Evaluación de alternativas	22
1.4.5 Elección de alternativa.....	23
Capítulo 2	24
2.1 Fundamentos de un proceso térmico solar	24
Mecanismos de transferencia de calor.....	24
2.2 Dirección de la radiación solar	25
2.3 Radiación solar total	37
2.4 Declive de la radiación solar en la atmósfera terrestre.....	38
2.5 Transferencia de calor sobre un concentrador parabólico	42
2.6 Eficiencia óptica del concentrador parabólico	50
2.7 Calor ganado y eficiencia térmica del colector	51

2.8 Balance de energía en la superficie del recipiente.....	55
2.9 Análisis del seguidor solar mecánico	58
Capítulo 3.....	60
3.1 Proyección a un sistema de inducción.....	60
3.2 Análisis económico	69
3.2.1 Costo de materia prima.....	70
3.2.2 Costo de mano de obra.....	71
3.2.3 Costo de proceso de manufactura	71
3.2.4 Costos varios.....	72
3.2.5 Costo final de la cocina parabólica	73
3.3 Recomendaciones para realizar los experimentos	74
3.3.1 Experimento 1.....	77
3.3.2 Experimento 2.....	79
3.3.3 Experimento 3.....	81
3.3.4 Experimento 4.....	83
3.3.5 Experimento 5.....	85
3.4 Análisis de resultados	86
3.5 Conclusiones.....	89
3.6 Recomendaciones	92
Referencias.....	93
Anexos.....	96

Tablas

Tabla 1. Reservas probadas de combustibles fósiles en el Ecuador	1
Tabla 2. Datos geográficos del cantón Quito	17
Tabla 3. Asignación de parámetros relevantes.....	19
Tabla 4. Tipos de concentradores solares	22
Tabla 5. Análisis de alternativas	23
Tabla 6. Características de equinoccios primavera-otoño y solsticios verano-invierno	34
Tabla 7. Variación ángulo: horario, altitud, azimut utilizando las características anteriores.....	35
Tabla 8. Ángulo de incidencia cuando $\beta = 0^\circ$ y cuando $\beta = 30^\circ$	36
Tabla 9. Valor mensual de espesor óptico τ_d, τ_{dif} y exponente de masa de aire d, dif	40
Tabla 10. Valores para la reflectividad del suelo o albedo	41
Tabla 11. Valores de la radiación total terrestre sobre un plano	42
Tabla 12. Valores de reflectividad especular para materiales solares de reflexión ...	44
Tabla 13. Relación de emisividad y absorptividad	45
Tabla 14. Valores propuestos para el diseño del concentrador parabólico	48
Tabla 15. Valores que definen la eficiencia geométrica del concentrador	50
Tabla 16. Características del fluido.....	56
Tabla 17. Características del recipiente	57
Tabla 18. Procesos de cocina y los ingredientes de platos cocinados cocinas GLP, eléctricas e inducción.....	63
Tabla 19. Costos de materia prima.....	70
Tabla 20. Costos de mano de obra	71
Tabla 21. Costos de manufactura	72
Tabla 22. Costos varios	73
Tabla 23. Costo final de la cocina parabólica	74
Tabla 24. Datos tomados en el Experimento 1	77
Tabla 25. Datos tomados en el Experimento 2	79
Tabla 26. Datos del Experimento 3.....	81
Tabla 27. Datos del Experimento 4.....	83
Tabla 28. Datos del Experimento 5.....	85

Figuras

Figura 1. Espejo ustorio Jardín de l'Infante del Louvre, París.....	6
Figura 2. Concentrador solar de August Mouchot	9
Figura 3. Cocina solar tipo parabólica	14
Figura 4. Tipos de cocina solar	14
Figura 5. Insolación global promedio anual en la provincia de Pichincha	16
Figura 6. Configuración de los concentradores solares	18
Figura 7. Movimiento de la Tierra en relación al Sol	25
Figura 8. Variación del ángulo de declinación.....	26
Figura 9. Ángulos que relacionan la posición de la Tierra con respecto al Sol	27
Figura 10. Función de la ecuación de tiempo ET.....	30
Figura 11. Gráfica ángulo altitud vs. Ángulo horario	32
Figura 12. Dirección de la radiación sobre una superficie inclinada	34
Figura 13. Esquema extinción de radiación en la capa atmosférica	38
Figura 14. Reflexión de la radiación	43
Figura 15. Geometría de un concentrador parabólico tipo PTC	47
Figura 16. Seguidor de eje único Este-Oeste con giro sentido Norte-Sur	59
Figura 17. Principio de funcionamiento de un sistema de inducción.	62
Figura 18. Gráfica Potencia vs. Tiempo para calentar 300 ml de leche.....	64
Figura 19. Gráfica desprendimiento de CO2 para calentar 300 ml de leche.	65
Figura 20. Diagrama básico para calentamiento de una cocina de inducción.	69
Figura 21. Equipo en donde se va a realizar los experimentos	76
Figura 22. Gráfica temperatura vs horas del día para ebullición de agua	78
Figura 23. Gráfica temperatura vs horas del día para ebullición de agua	80
Figura 24. Gráfica temperatura vs horas del día para hacer canguil	81
Figura 25. Gráfica temperatura vs horas del día para freír papas	83
Figura 26. Gráfica temperatura vs horas del día para freír corvina	85
Figura 27. Unión para el anillo base	96
Figura 28. Soldadura platinas curvas	96
Figura 29. Corte del molde con cizalla	97
Figura 30. Colocación y unión de los moldes a la estructura.....	97
Figura 31. Soldadura de mesa soporte	98
Figura 32. Paraboloide final.....	98

Figura 33. Cocina parabólica	99
Figura 34. Lectura del pH y calentamiento de agua.....	99
Figura 35. Cocción de canguil	100
Figura 36. Cocción de papas con las temperaturas antes y después de freír.....	100
Figura 37. Al freír corvina y la temperatura final	101
Figura 38. Plato típico ecuatoriano en una cocina solar parabólica.....	101
Figura 39. Implementación de los elementos de inducción sobre la olla.....	102

Ecuaciones

Ecuación 1.....	26
Ecuación 2.....	28
Ecuación 3.....	28
Ecuación 4.....	28
Ecuación 5.....	29
Ecuación 6.....	30
Ecuación 7.....	31
Ecuación 8.....	33
Ecuación 9.....	33
Ecuación 10.....	37
Ecuación 11.....	38
Ecuación 12.....	39
Ecuación 13.....	39
Ecuación 14.....	40
Ecuación 15.....	40
Ecuación 16.....	43
Ecuación 17.....	45
Ecuación 18.....	46
Ecuación 19.....	46
Ecuación 20.....	47
Ecuación 21.....	48
Ecuación 22.....	49
Ecuación 23.....	49
Ecuación 24.....	50
Ecuación 25.....	50
Ecuación 26.....	51
Ecuación 27.....	51
Ecuación 28.....	51
Ecuación 29.....	52

Ecuación 30.....	53
Ecuación 31.....	53
Ecuación 32.....	53
Ecuación 33.....	53
Ecuación 34.....	54
Ecuación 35.....	55
Ecuación 36.....	55
Ecuación 37.....	57
Ecuación 38.....	58
Ecuación 39.....	58
Ecuación 40.....	67
Ecuación 41.....	67
Ecuación 42.....	68
Ecuación 43.....	68

Introducción

Planteamiento del Problema

La gran problemática actual es la necesidad de dejar de depender de los combustibles fósiles para que no se convierta a futuro en un inconveniente para el Ecuador. Según las estadísticas publicadas por (AIHE, 2012) el país tiene reservas como máximo de 20 años para que perciba una drástica disminución de producción de petróleo. Por lo tanto, teniendo claro que la mayor fuente de ingresos es la venta de barriles de crudo pesado al mercado internacional, los datos de la Tabla 1.1 muestran que si no se actúa de manera inmediata, habrá una crisis alarmante entre la relación de la demanda de energía y la capacidad económica y tecnológica del país para poder transformarla.

Tabla 1.

Reservas probadas de combustibles fósiles en el Ecuador

Detalle	Cantidad	(R/P) ^a
Petróleo ^b	1.2×10^9 (ton)	42.6
Gas natural ^c	1.7×10^{18} (pies ³)	-
Carbón	-	-

Nota: ^aRatio reservas-producción(R/P) Si las reservas restantes al final de cualquier año son divididas para la producción en ese año, el resultado es la duración de tiempo que esas reservas restantes durarían si la producción fuera continuar a ese ratio.

^bBritish Petroleum.(2014). BP Statistical Review of World Energy (p.48). British Petroleum-Energy economics.

^cIncremento de la producción y nuevas reservas amplían horizonte de gas natural en el Ecuador

Fuente: (Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador, 2012).

La necesidad de encontrar formas de transformar la energía renovable para uso doméstico e industrial ha hecho que la administración energética del país busque utilizar al máximo sus recursos, como es el caso de la energía hidráulica, muy apreciada porque aportará con energía a miles de hogares a un “bajo coste”. Sin embargo, tiene una gran limitante, que son los niveles de reserva de las

hidroeléctricas, lo cual quiere decir que habrá períodos de tiempo, pueden ser hasta meses, que el nivel estará bajo el margen de seguridad de funcionamiento, por lo tanto las centrales no podrán entregar la suficiente energía al país (CONELEC, 2013).

De esta manera, se propone en este proyecto la utilización de energías alternativas; en particular, de la energía solar térmica aprovechada por un concentrador solar, cocina solar, el cual permite la cocción de alimentos con virtualmente nulas emisiones tóxicas al ambiente, simultáneamente aportando con mayores contribuciones y ventajas energéticas, económicas, higiénicas y sociales. Por lo tanto, una cocina que funcione a base de energía solar es la mejor alternativa y respuesta definitiva para familias que habitan en áreas rurales y que no tengan acceso a un suministro eléctrico, 2.5% de la población ecuatoriana no tenía acceso a este servicio en 2010 (World Energy Outlook, 2010). La energía contenida en la madera fue el principal recurso utilizado para cocer los alimentos desde la antigüedad hasta que fue reemplazado por los combustibles fósiles, pero como se ve reflejado en los datos se cuantifica una escasez en la producción de este recurso, aunado a esto está la necesidad que presenta la sociedad de utilizar energías limpias que tengan un impacto mínimo en el ambiente.

La cocina solar es la respuesta para personas cuya economía se ha visto afectada por el precio del gas doméstico y a la escasez del mismo; o que simplemente han cuestionado a los ingenieros sobre la solución de problemas como: la manera de priorizar el ahorro energético, el modo de ingerir alimentos preparados con un proceso más saludable y el deseo de mitigar la contaminación ambiental. Por lo tanto, la cocina solar ayudará a responder estas interrogantes al obtener datos reales y verificables a través de su construcción y uso.

Finalmente, este proyecto está enfocado en aportar con un análisis técnico completo porque es necesario conservar un registro de este tipo de dispositivos, cuya construcción se encuentra extendida de forma artesanal, pero con muy poca información estandarizada.

Objetivos

Objetivo General.

Implementar una cocina tipo parabólica que funcione a partir de energía solar para el calentamiento de agua y cocción de alimentos en la ciudad de Quito, en el año 2016.

Objetivos Específicos.

- Analizar el estado del arte de los diferentes tipos de cocina solar.
- Diseñar una cocina solar tipo parabólica en base a parámetros como declinación, heliofanía, ángulo de apertura de la parábola, datos previamente calculados.
- Seleccionar materiales que aporten a la captación de radiación solar, previo estudio.
- Construir la cocina solar en base a los datos determinados y materiales seleccionados.
- Realizar pruebas de funcionamiento en días aleatorios con diferentes alimentos y a diferentes temperaturas.
- Determinar la factibilidad de que al sistema construido se le pueda acoplar un sistema de inducción.

Capítulo 1

1.1 Información general

Cocina solar

El surgir de la tecnología solar no es un fenómeno actual. Este capítulo se enfoca en exponer el trasfondo histórico en el cual el hombre ha aprovechado la energía que el sol provee, a través de distintos dispositivos tecnológicos. Y cómo por medio de éstos, la radiación solar ha sido utilizada por la gente con el objetivo de secar frutas, vegetales, pescado y carne para a continuación preservarlos o cocinarlos para el sustento.

El ser humano ha utilizado la energía proveniente del sol desde hace miles de años atrás. Se considera uno de los dispositivos registrados más antiguos el de Arquímedes, quien utilizó espejos ustorios, con el propósito de defender la ciudad de Siracusa en el siglo III A.C. y cuya función era la de reflejar y concentrar la radiación solar en un solo punto llamado foco de espejo para encender fuego sobre los barcos de guerra romanos.

No es hasta el siglo XVII, cuando comienza realmente el interés de los científicos e inventores hacia la energía solar térmica para poder hacer práctico su uso en la industria y en la vida diaria de las personas, por lo que ya en el siglo XVIII se evidencia el avance alcanzado ya que se experimenta con distintos diseños como el espejo ustorio representado en la Figura 1, el cual data de octubre de 1774.

Entre los años de 1676 y 1679, en un viaje de estudios por el sur de Europa, visitando reinos pertenecientes a la actual Italia y parte de Francia, el científico alemán Ehrenfried Walther von Tschirnhaus participó en experimentos sobre fusión utilizando espejos focales de 1625 mm de diámetro, instrumento cuyo diseño lo

realizó junto a François Villette. Fue su trabajo experimental en Francia donde conoció también a Christiaan Huygens, cuyo trabajo en óptica es importante por su teoría ondulatoria de la luz, donde se explican conceptos como la reflexión, refracción y doble refracción de la luz y quien también ayudó al científico alemán a mejorar el diseño de sus espejos. Tschirnhaus se planteó la producción de espejos focales para la venta; veía una gran aplicación en ellos, al alcanzar fácilmente temperaturas de 1400 °C, pero pronto desechó la idea debida a los altos costos que significaba la fabricación de los elementos. Su trabajo con concentradores solares es reconocido debido a que realizó mejoras significativas en sus componentes aplicando técnicas ópticas y geométricas para su desarrollo.

En 1767, Horace-Bénédict de Saussure construyó el primer horno solar utilizando vidrio, a diferencia de sus contemporáneos, que utilizaron espejos focales debido a que éstos les proporcionaban temperaturas más altas en menor tiempo. Sin embargo, su objetivo no era fundir metal ni tampoco otra aplicación que la de ser capaz de conservar el calor para la cocción de alimentos en un dispositivo cuyo diseño estaba formado por tres capas de vidrio que aislaban bien las pérdidas por conducción y radiación, por lo que experimentó con materiales que poseían un coeficiente bajo de transferencia de calor, este dispositivo alcanzó los 88°C.

Sus experimentos le llevaron a una importante conclusión, la cual establece que la temperatura del aire externo no tiene un papel significativo en el efecto del calentamiento solar sobre este dispositivo. Este acontecimiento es de vital importancia al comprender características de la radiación térmica, ya que en la actualidad se conoce que el aire es una sustancia diatérmica, es decir una sustancia que admite el paso de radiación térmica sin afectar de modo alguno su temperatura, además que la altura, por sí misma, tampoco tiene un efecto significativo en la

temperatura debido a que la irradiancia solar total incide a una tasa constante $I_0 = 1367 \text{ [W/m}^2\text{]}$, dato tomado de (Duffie & Beckman, 2013), aunque en realidad varía en forma mínima debido a la distancia que se encuentra la Tierra del Sol, para lo cual se emplea una longitud media.

Presentación de un concentrador solar a finales del siglo XVIII

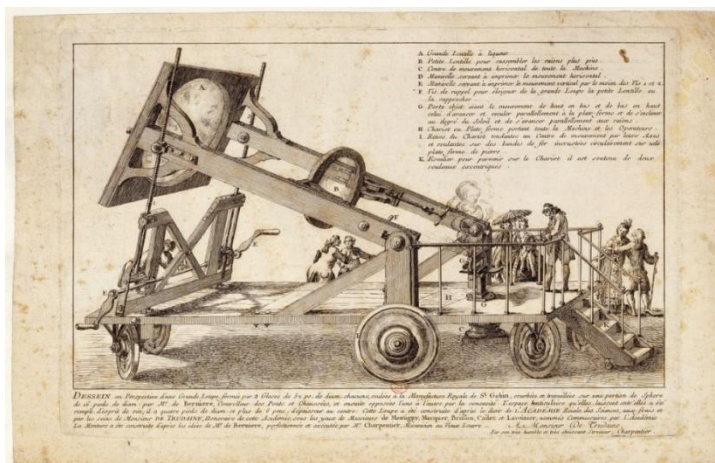


Figura 1. Espejo ustorio Jardín de l'Infante del Louvre, París

Fuente: (Saint-Gobain, 1774)

De esta observación también se dedujo que la densidad atmosférica, la cantidad de dióxido de carbono y vapor de agua, existente a determinadas condiciones actúa como un aprisionador de calor del mismo modo que las capas de vidrio en el horno solar. Esta es la razón por la que las regiones montañosas alcanzan temperaturas más bajas que los lugares situados a menores alturas que logran temperaturas más elevadas, puesto que la transferencia de calor es más lenta en el último caso. Por otro lado, lo que destaca nuevamente de sus experimentos fue la posibilidad de darle una perspectiva de avance tecnológico a la cocción de alimentos por medio del calentamiento solar.

Entre los años de 1834 y 1838, durante su estancia en Sudáfrica, el astrónomo inglés John Herschel puso en práctica la tecnología de cocción solar en el Cabo de

Buena Esperanza. El científico fabricó una caja de color negra hecha de madera dura con una ventana de doble vidrio sin un reflector y enterrada en la arena con el propósito de aislar térmicamente el dispositivo, el mismo que alcanzó una temperatura de 68°C.

Sin embargo, quien tomó la posta dejada por de Saussure fue Augustin Mouchot, inventor y profesor francés del siglo XIX; junto a su coterráneo Abel Pifre, ingeniero e inventor, quienes concibieron el primer motor solar equipado con un concentrador parabólico presentado en 1878. A pesar de que, el propósito final de Mouchot fue el de transformar la energía solar en trabajo mecánico, fue inspirado por los trabajos de Saussure y la información obtenida de sus experimentos los que lo llevaron a utilizar esta nueva configuración geométrica. De esta manera, experimentos en la ciudad de Argel con un modelo de tipo concentrador parabólico que contaba con una superficie de 1 m² hervía 1 litro de agua en 12 minutos y producía 1.322 litros de vapor por hora.

Otro ensayo hecho en la Plaza El Trocadero, París; con un modelo cuya superficie de captación contaba con 24 m² estaba unido a una caldera de hierro con una capacidad volumétrica de 100 litros de agua dispuesta en la Figura 2. Por lo que, el 2 de Septiembre de 1878 se obtuvo la ebullición de 70 litros de agua en 30 minutos a una presión de 6 atmósferas. No obstante, la creatividad y gran ingenio plasmada en numerosas patentes de Abel Pifre y el deseo de Mouchot para que la energía solar sustituya al carbón; sus ideas no fueron comercializadas por los empresarios de aquella época a pesar de haber ganado tantos premios y reconocimientos, puesto que era mucho más rentable la explotación de carbón.

De ello la frase de Mouchot, casi profética para la generación futura: “Finalmente la industria no encontrará más recursos en Europa con el fin de satisfacer su prodigiosa expansión. Sin duda se agotará el carbón. ¿Qué hará entonces la industria?” (Mouchot, 1879).

En el siglo XX el astrofísico estadounidense Charles Greeley Abbot, secretario del Observatorio Astronómico Smithsonian (SAO), estudió y diseñó diversos métodos para medir la constante solar; esta búsqueda le permitió posteriormente centrarse en investigar sobre dispositivos solares por lo que tiene patentado un tipo de cocina solar, una caldera solar y hasta un destilador solar.

Otra destacada científica del pasado siglo fue la Dr. Maria Telkes, científica e inventora de origen húngaro, quien en 1948 recibió una subvención del gobierno norteamericano para diseñar un horno solar con el cual se pudiera cocinar cualquier tipo de alimento, por cualquier individuo y en cualquier lugar del mundo, que sea lo suficientemente seguro para ser usado hasta por un niño. En 1953 la Fundación Ford comisionó a Telkes para que diseñara un horno solar de fácil construcción para aplicarlo en los países pobres, este dispositivo alcanzó una temperatura de 177°C.

Finalmente, uno de los inventores que ha contribuido de forma importante al progreso de la tecnología solar en cocinas es el Dr. Farrington Daniels, considerado un pionero en el uso directo de la energía solar. En 1959, el Dr. Daniel inclinó toda su investigación hacia la energía solar en la Estación Experimental de Ingeniería donde trabajaría junto a John Duffie.

La investigación produjo colectores de concentración, cocinas solares, motores solares y refrigeradoras solares.

Concentrador solar en la exhibición universal de París, 1878

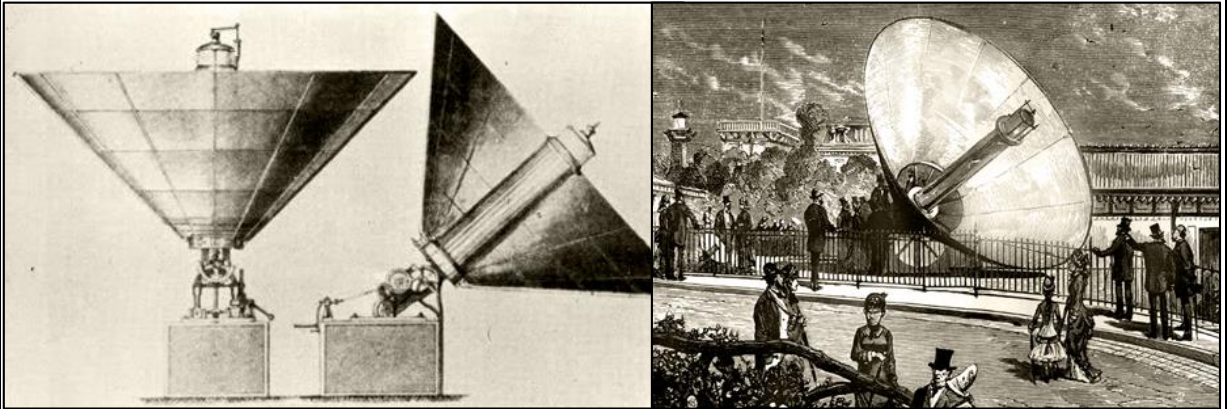


Figura 2. Concentrador solar de August Mouchot

Fuente: (Butti & Perlin, 1980)

1.2 Definición y principio de funcionamiento

Una cocina solar es un intercambiador de calor que transfiere la radiación proveniente de la energía solar para entregar calor a los alimentos, con el propósito de elevar su temperatura y provocar los cambios químicos propios del proceso de cocción. Hervir y hornear con la luz del sol son de las aplicaciones más simples de la energía solar, a la par su principio de funcionamiento también lo es.

La irradiancia solar total entrante al planeta, es reunida por medio de un colector solar; que a su vez, dependiendo del tipo de método de cocina elegido, refleja la radiación por medios de espejos hacia un receptor en el caso de los colectores tipo concentrador, donde se hierve una olla conteniendo alimentos en estado sólido o líquido; de otra manera, se “aprisiona” la radiación entrante por medio del vidrio u otro material para de esta forma aumentar la temperatura de un sistema cerrado y así favorecer la transferencia de calor hacia el interior y disminuir las pérdidas de calor

por convección con el entorno, en el caso de los colectores de tipo placa plana. Aunque existen muchos métodos para cocinar alimentos, se puede esbozar de forma generalizada el proceso termodinámico y el mecanismo de transferencia de calor presentes de alguno de ellos: Al freír y al hervir, el calor es transferido hacia la comida en estado sólido desde el líquido calentado, mientras que al hornear y asar, el calor es transferido tanto por convección desde el aire calentado de los alrededores y algunas veces por radiación desde superficies calientes.

1.3 Clases de cocina solar

La cocina solar debe clasificarse tomando en consideración su componente más importante que es el colector y aunque los diseños pueden variar debido a sus partes mecánicas como el tipo de seguidor solar instalado, el tipo de soporte estructural, el tamaño del receptor y por otro lado hasta el tipo de cocción de alimentos a emplear, etc. Están todos en función del tipo de colector a operar, es decir, todos cumplen una función pasiva debido a que sin colector la radiación no tiene un medio por el cual pueda reflectarse o pueda ser absorbida hacia el receptor. Sin duda alguna es evidente que los otros elementos son claves al momento de mejorar la eficiencia del dispositivo, pero harían muy compleja e ininteligible su clasificación, por lo que se explicará posteriormente la importancia de cada uno de sus componentes.

Los colectores solares están clasificados en dos ramas importantes: los colectores de placa plana, los cuales no concentran la radiación y los colectores de enfoque o de concentración. Tomando en cuenta este ordenamiento se puede explicar los tipos de cocinas más estudiados y utilizados en el ámbito científico.

1.3.1 Cocinas con colectores de placa plana

En este tipo de cocinas la placa absorbe la radiación aumentando así su temperatura y transfiere el calor hacia un fluido, usualmente agua o aire, que circula sobre la parte trasera del colector. Al mismo tiempo el colector ya calentado disipa calor hacia los alrededores por: convección mediante el movimiento de las corrientes de aire, por conducción hacia el aire y hacia las partes más frías de la estructura que protege al receptor. Su diseño más representativos es la cocina tipo caja.

1.3.2 Cocina tipo caja

La cocina solar tipo caja es un contenedor aislado integrado con una cubierta múltiple o individual de vidrio. Este tipo de cocina depende del efecto invernadero en el cual la transparencia del material de origen vidrioso permite el paso de radiación solar con longitudes de onda corta, pero es opaco para la mayor parte de radiación solar con longitudes de onda larga que ingresa desde objetos calentados a relativa baja temperatura. La parte interna de la caja está recubierta por una pintura negra con el propósito de maximizar la absorción de luz solar. A temperaturas de 100°C a 300°C la emisión de radiación máxima ocurre sobre los 8 a 10 micrómetros [μm] en el infrarrojo como explica (Cengel, 2007) y de este modo la pérdida de calor es disminuida y la temperatura operativa del colector aumentada al colocar una o dos láminas más de vidrio sobre la superficie negra del receptor en una cocina tipo caja hermética, es decir con aproximación a un sistema adiabático.

1.3.3 Cocinas con colectores de concentración

Obtener temperaturas mucho más altas es posible con colectores de concentración, pero usualmente su costo es elevado, además necesitan estar en movimiento constante para seguir el curso del sol y pueden usar solo la radiación que llega descongestionada directamente del sol. Por ejemplo, la radiación solar

concentrada con espejos parabólicos circulares puede proporcionar temperaturas arriba de los 3500 °C o menos dependiendo de la perfección óptica del colector parabólico.

Cocina tipo panel

En este tipo de cocinas los paneles concentran la luz solar sobre una olla o vasija recubiertas de un material o pintura oscura. Algunos paneles pueden alcanzar temperaturas relativamente altas y operan con mayor eficiencia en climas tropicales durante los meses más calientes. Un panel de cartón económico recubierto de una lámina aluminizada puede calentar comidas a 121°C.

Cocina tipo esférica

No es necesario tener un espejo parabólico perfecto para conseguir radiación solar de gran intensidad produciendo altas temperaturas. Los colectores y espejos esféricos pueden dar una concentración bastante aceptable, suficiente para muchos propósitos, en el uso de la energía solar. Su diseño puede ser explicado de esta manera: Cuando una lámina de plástico aluminizado es unida sobre la parte trasera de un aro y otra lámina de plástico es unida por el frente y ambas son infladas con aire comprimido, cada lámina se asemejará a una figura semiesférica con una superficie perfectamente lisa y altamente reflectante. La longitud de concentración dependerá de la presión del aire y del espesor y elasticidad de la capa de plástico. Con un aro de 1.2 m de diámetro unido a la lámina aluminizada de 1 mm de espesor es fácil obtener una concentración nítida en una longitud focal de 508 mm o menos.

Cocina tipo Fresnel

Otro dispositivo utilizado para concentrar energía solar es el lente Fresnel, en el cual un nido de estrías circulares es cortado de una lámina de plástico transparente

con los lados de cada anillo sucesivo dispuestos, de tal manera que, la luz que pasa a través de cada estría es refractada en un ángulo ligeramente diferente y la cual converge sobre un punto. Estos lentes han sido prensados en láminas de plástico y son efectivos al otorgar un enfoque nítido.

Cocina tipo parabólica

Cuando un paraboloide es apuntado hacia el sol, toda la luz que cae sobre su superficie de espejo es reflejada hacia un punto conocido como foco. Adicional a esto, una olla negra es ubicada en el foco, mostrado con el nombre de “parrilla para el recipiente de cocción” en la Figura 3, donde se absorberá la radiación reflectada y elevará su temperatura debido a la transferencia de calor.

De hecho, al poder alcanzar temperaturas relativamente altas en poco tiempo, 150°C en 90 minutos [min] para calentar una capacidad de 5 litros[l] de agua (López, 2012), pueden ser usadas también como generadores de vapor, generadores para motores Stirling y hasta para la separación del hidrógeno como gas.

La porción del área del espejo para la imagen enfocada del sol es definida por la perfección del espejo concentrador, pero usualmente no llega a la perfección óptica y la imagen del sol no es enteramente circular ni uniforme. Lo que quiere decir que partes de la imagen proyectada estarán más calientes que otras. Por esta razón el receptor es lo suficientemente ancho.

En síntesis, encuestas realizadas a nivel mundial muestran que existe una amplia variedad de tipos de cocinas solares.

Sin embargo, los diseños disponibles de cocinas solares entran en las cuatro categorías ya mencionadas: horno solar tipo caja, cocina tipo panel, cocinas tipo colector, cocinas tipo parabólico (concentradores). (Duffie & Beckman, 2013).

Representación esquemática de una cocina solar tipo parabólica con sus partes

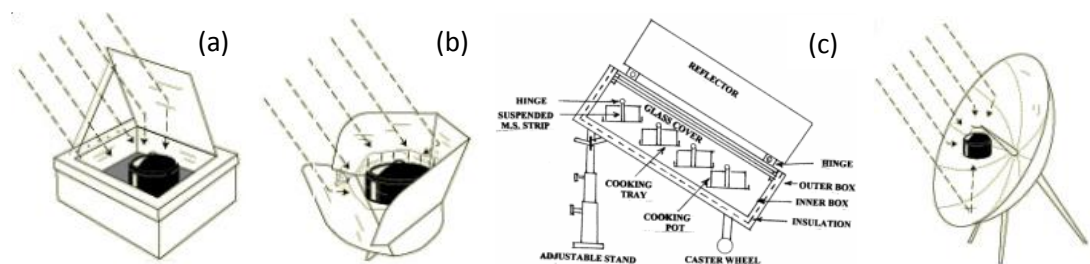


Figura 3. Cocina solar tipo parabólica

Fuente: (Seifert, 2009)

En la Figura 4 se muestra los cuatro diseños más importantes en el que el elemento común para cada tipo es la superficie brillante reflectante que dirige la radiación solar hacia el área de cocinado. El diseño de las Figuras 4(b) y 4(d) se basa en concentrar toda la radiación entrante en un solo punto, a excepción de las de tipo horno Figuras 4(a) y 4(c),

Representación esquemática de las diferentes cocinas solares



(a) Horno tipo caja (b) Tipo panel (c) Tipo colector (d) Tipo parabólico

Figura 4. Tipos de cocina solar

Fuente: (Electronics Hub, 2015) (Sankhasubhra , 2003)

Cada diseño tiene sus ventajas y desventajas como por ejemplo las de tipo caja son fáciles de construir, pero posee un pésimo desempeño térmico; mientras que, la de tipo parabólico es bastante eficiente, alcanza temperaturas altas, no obstante, se debe tener cuidado en su uso, ya que puede causar lesiones por quemaduras. Sin embargo, esto también la limita al calentamiento de un solo recipiente, pero por otro lado mejora su rendimiento al requerir menos tiempo en la cocción de alimentos. Otra característica importante es que los concentradores no necesitan estar colocados a alturas considerables, aun así la inclinación si es un factor clave para su funcionamiento y este ajuste dependerá de la variación climática que se presente, como también del seguimiento solar a lo largo del día.

1.4 Criterio de selección del tipo de cocina solar tipo parabólica

1.4.1 Ubicación geográfica de la cocina

Previamente se estableció una perspectiva general sobre la cocina solar y sus tipos más representativos. Teniendo en cuenta esto, lo siguiente es establecer la hipótesis para este proyecto la cual es la de diseñar y construir una cocina tipo concentrador parabólico, con el propósito de entregar temperaturas relativamente altas en un periodo corto de tiempo para la cocción de alimentos. Por lo tanto, el objetivo a cumplir es alcanzar la temperatura de cocción en un tiempo de 90 min. Para calentar un volumen de 4 [l] de fluido de trabajo.

Para lo cual, el tipo de cocina más apropiado sería una de tipo concentrador parabólico, por lo que en este capítulo se analizará y demostrará porqué es la más adecuada.

Este dispositivo es dependiente totalmente de la radiación solar por lo cual la locación en Quito, Ecuador influye en sobremanera el diseño del dispositivo.

Atlas de insolación para la provincia de Pichincha

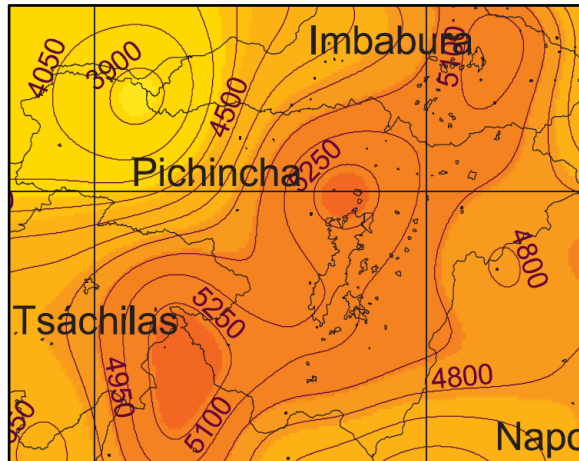


Figura 5. Insolación global promedio anual en la provincia de Pichincha

Fuente: (CONELEC, 2008)

Por medio del informe del Atlas Solar del Ecuador se puede determinar la insolación global en un determinado mes, tanto global como también la radiación directa y difusa en cualquier lugar del país. De tal manera, en la provincia donde se encuentra la ciudad de Quito y por tanto el proyecto a ejecutar es Pichincha en donde según la Figura 5 se tiene una insolación promedio anual de 5250 [Wh/(m²día)] . Dato que se puede comparar con la radiación global anual que varía entre los 5000 y 6500 [Wh/(m² día)] en el sur del estado norteamericano de California. (National Renewable Energy Laboratory, 2012).

Tabla 2.
Datos geográficos del cantón Quito

Detalle	Característica
Provincia	Pichincha
Región	Sierra
Longitud	78°30'35''W (−78.509722°)
Latitud	0°13'17''S (−0.218611°)
Altitud	2850 [m. s. n. m]
Horas de Sol (anual)	2058 [h]
Temperatura media (anual)	13.3°C
Población	2 234000 [habitantes]

Nota: Muestra los valores para la ubicación del proyecto.

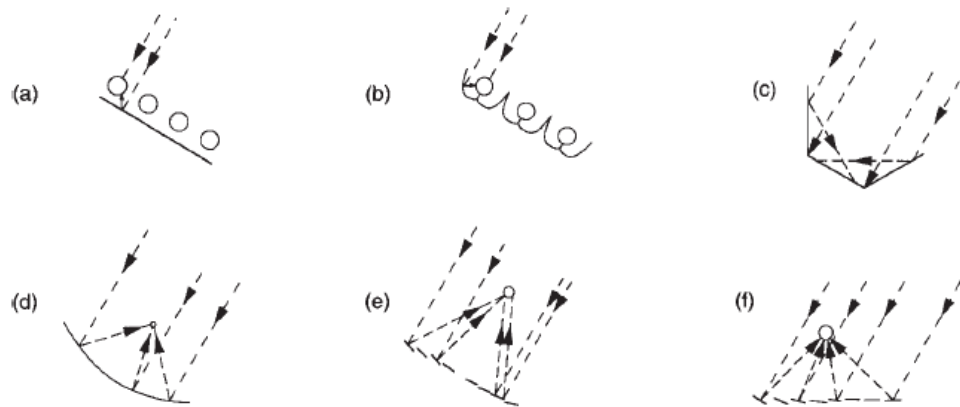
1.4.2 Elección del tipo de concentrador

La importancia de conocer la terminología evitará una equivocación en el análisis posterior. Para lo cual, se entenderá como colector a todo el sistema completo, es decir donde se incluyen tanto al concentrador como al receptor. El receptor es el elemento del sistema en el cual la radiación es absorbida y convertida en calor hacia el envase con el fluido de trabajo, donde se incluye el material adecuado para la absorción y el aislamiento. El concentrador o medio óptico, es la parte del colector que direcciona la radiación sobre el receptor. La apertura del concentrador es la abertura a través de la cual la radiación solar entra al concentrador.

Para el criterio de selección se tomará en cuenta solamente las de tipo colectores de concentración, ya que en dicha sección las temperaturas que se obtienen con dichos dispositivos son de interés en este proyecto. Muchos tipos de concentradores

están disponibles para aumentar el flujo de radiación sobre cualquier receptor. Por lo que, se pueden dividir en reflectores y refractores.

Muestra de distinta geometría en los concentradores



(a) Absorción tubular con reflector difuso posterior, (b) absorción tubular con reflector de encrucijada especular, (c) receptor plano con paneles reflectores (d) concentrador parabólico (e) reflector Fresnel (f) arreglo helióstato con receptor central

Figura 6. Configuración de los concentradores solares

Fuente: (Duffie & Beckman, 2013)

Además, los concentradores pueden ser cilíndricos para enfocar sobre una línea o circulares para enfocar en un punto. Los receptores pueden ser cóncavos, planos o convexos. En la Figura 6 se puede observar seis tipos diferentes de concentradores. La diferencia fundamental entre ellos, además de la geometría, es el punto de concentración y como se explicará más adelante, según la aplicación requerida un modelo tendrá más fortalezas o a su vez desventajas que otros. En este proyecto se hace hincapié en el estudio de un concentrador con superficie de revolución. Superficies tales como circular y parabólico, son claros ejemplos. A continuación se expondrá el porqué de la decisión de construir uno de geometría parabólica. Aunque, para poder entender la elección de un concentrador se necesita conocer la relación de su geometría y ubicación geográfica con respecto a la radiación solar entrante. No

obstante, en la elección de esta cocina solar se puede aplicar el método cualitativo por puntos (Baca Urbina, 2013) el método permite ponderar factores de preferencia para el investigador al tomar una decisión, lo que permite establecer una comparación cuantitativa de diferentes parámetros relevantes para determinar si entre la cocina solar con concentrador parabólico existe una calificación ponderada mayor para un seguidor en dos ejes que la que habría sobre la un sistema de un solo eje. Los valores asignados en la Tabla 3 tienen que llegar a sumar la unidad. Estos valores son puntos de referencia que propone el investigador donde se resaltan los parámetros, en los cuales recae la importancia de la elección entre dos alternativas. Los parámetros relevantes y sus valores a evaluar son los siguientes:

Tabla 3.
Asignación de parámetros relevantes

Parámetro relevante	Valor asignado
Temperatura del concentrador	0.55
Capacidad de seguimiento solar	0.25
Facilidad de construcción	0.20
Total	1

Nota: Valores asignados según la importancia del cada parámetro.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Temperatura del concentrador

La temperatura que se logre alcanzar en el receptor por medio de la transferencia de calor por la radiación reflejada desde el concentrador, es de gran importancia, ya que determinará el tiempo de cocción de alimentos y los límites de temperatura a los que puede llegar la cocina. De este modo, como se muestra en la Tabla 4 la relación de concentración determina el límite de temperatura que pondrá alcanzar el colector; adicional a esto, mientras más altos los valores de temperatura se quieran alcanzar deberá tener un mejor sistema de corrección y seguimiento solar.

Capacidad de seguimiento solar

Debido a que la cocina solar no puede permanecer fija a lo largo del día, se efectúa una corrección en su disposición por lo que según detalla (Duffie & Beckman, 2013) el movimiento necesario en un concentrador para mantener el curso de la posición del sol durante las horas de luz está influenciado directamente por el diseño óptico. Además, como se explicará en lo posterior el movimiento necesario se lo podría realizar a través de un sistema manual o de otro modo por un sistema de control electrónico y mecánico, dependiendo de la razón de concentración.

Facilidad de construcción

En el proyecto se plantea la posibilidad de que la construcción del dispositivo sea lo más accesible posible para que tenga cabida en los hogares. Para lo cual se estima obtener materiales asequibles en el mercado y aun así que no se afecte en gran manera la eficiencia del dispositivo. Finalmente, dependiendo del tipo de geometría, el diseño varía y por tanto su costo en materiales y forma de fabricación.

1.4.3 Análisis de alternativas

Colector parabólico con seguimiento en un solo eje

Cuando la posición del concentrador necesite ser corregida el seguimiento en un solo eje puede dar las siguientes alternativas: este-oeste, norte-sur, o paralelo al eje terrestre.

Ventajas

Aumenta la eficiencia del concentrador en contacto con la radiación directa, pero también es útil para días nublados y para poblaciones cuya gente tiene escasez de

recursos, por lo que representa un costo menor con respecto al seguimiento de dos ejes. No necesita programas complejos de mantenimiento.

Desventajas

Durante los días nublados la eficiencia del seguidor es casi como la de un concentrador fijo. El seguimiento está diseñado para solamente tener movilidad en una dirección; por lo cual, por ejemplo, limitará y solo realizará el seguimiento diario y no de forma anual.

Colector parabólico con seguimiento en dos ejes

El seguimiento en dos ejes también conocido como seguimiento completo mantiene al colector orientado continuamente durante las horas de luz solar, con un mecanismo capaz de ser controlado desde la salida hasta la puesta del sol.

Ventajas

La mayor ventaja que tiene es su grado de movilidad. Puede ser programado para que corrija su posición tanto diariamente como de forma anual.

Desventajas

Su implementación es costosa porque incluye un sistema más complejo que el de un solo eje. Un costoso programa de mantenimiento por los componentes que posee como motores y elementos tanto mecánicos como electrónicos. Este sistema es bastante útil para concentradores parabólicos de gran magnitud que deben estar operativos durante todo el año y utilizar todas las horas de luz disponibles diariamente. La eficiencia no aumenta drásticamente con respecto a la del seguidor en un solo eje, pero evita pérdidas térmicas al mantener enfocado al colector.

Tabla 4.
Tipos de concentradores solares

Movimiento	Tipo de colector	Tipo de receptor	Relación de concentración	Rango indicativo de temperatura(°C)
Seguimiento en un solo eje	Colector parabólico compuesto	Tubular	5-15	60-300
	Reflector linear Fresnel	Tubular	10-40	60-250
	Colector cilíndrico	Tubular	15-50	60-300
	Colector cilindro-parabólico	Tubular	10-85	60-400
Seguimiento en dos ejes	Reflector disco parabólico	Puntual	600-2000	100-1500
	Colector campo heliostato	Puntual	300-1500	150-2000

Nota: Valores de temperatura que alcanzan distintos tipos de concentradores solares.

Fuente: (Kalogirou, 2009)

1.4.4 Evaluación de alternativas

Para poder tomar una decisión entre los dos tipos de sistemas de seguimiento se hace una calificación en un rango de 1 a 10. Siendo 1 un sistema complicado y costoso de construir, mientras que cuando se acerca al 10 se encuentra una mayor facilidad de acceder a los materiales y procesos de construcción de todo el sistema. Los valores detallados en la calificación muestran el grado de importancia que se ha dado a cada parámetro, que parte del criterio de que para un mayor valor de calificación es más factible construir un paraboloide con el propósito único de cocinar alimentos. En la Tabla 5 se multiplica el valor asignado por la calificación y se obtiene la calificación ponderada, la cual se suma verticalmente para obtener el resultado total y comparar los valores finales.

Tabla 5.
Análisis de alternativas

Parámetro relevante	Valor asignado	Colector parabólico con seguimiento en un solo eje		Colector parabólico con seguimiento en dos ejes	
		Calificación	Calificación ponderada	Calificación	Calificación ponderada
Temperatura del concentrador	0.55	7.5	4.1	7.5	4.1
Capacidad de seguimiento solar	0.25	6.5	1.6	8.5	2.1
Facilidad de construcción	0.20	7.9	1.5	2	0.4
Total	1		7.2		6.6

Nota: Se aprecia en la Tabla 5 que el valor asignado en la facilidad de construcción es determinante.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

1.4.5 Elección de alternativa

En la Tabla 5 al aplicar el análisis la calificación ponderada se tiene como resultado y como máxima puntuación la construcción de una cocina solar parabólica con sistema de seguimiento en un solo eje. La razón del valor de esta puntuación por encima de la otra opción es que a pesar que el sistema de dos ejes presenta una mayor libertad de movilidad, tiene un alto costo. Por lo cual, construir un sistema complejo de dos ejes para una relación de concentración mínima para la cocción de alimentos, no lo hace viable. Se busca tratar de superar un máximo de 90°C en 150 min conseguidos por (Kimambo, 2007) con una cocina parabólica de aluminio pulido y una insolación de 1000[W/m²] y por tanto asegurar que los límites del material y el diseño ópticos permitan llegar al objetivo, por lo que se demostrará que la primera opción con un seguidor en un solo eje es la más adecuada, con un costo bajo para poder emplear en áreas campestres.

Capítulo 2

2.1 Fundamentos de un proceso térmico solar

Mecanismos de transferencia de calor

Se puede simplificar el análisis de este proyecto al diferenciar los dos modos de transferencia de calor que existe en la naturaleza: la radiación y la convección.

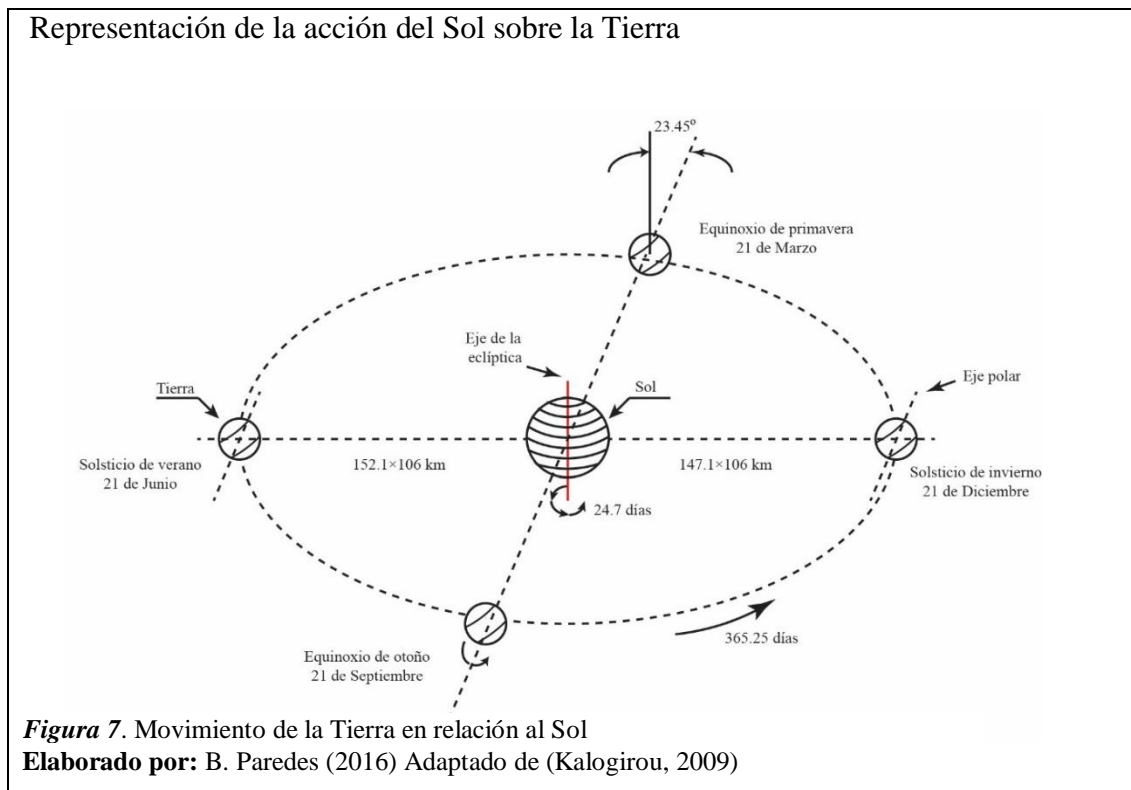
Radiación

La radiación es un fenómeno completamente diferente al de la convección. La manera de apreciar esta diferencia es mediante la definición experimental de la radiación, la cual establece que, la diferencia de temperatura puede existir entre cuerpos, que ocupen un lugar en el espacio, sin necesidad de que la temperatura del medio entre ellos se altere de manera alguna (Maxwell, 1902). La razón principal por la que este proyecto es posible es debida a la radiación que recibe la Tierra, la cual es transferida desde la energía producida de la fusión nuclear en el interior del Sol. A pesar de que, toda esa energía que es emitida de forma permanente, solo una parte de ella puede ser aprovechada por el ser humano para ser captada por las tecnologías solares.

Para diferenciar de manera clara el comportamiento de la radiación a medida que entra en contacto con algún objeto en el espacio se recurre a ciertas relaciones esenciales como: La irradiancia solar que se establece como la relación de cambio a la cual la radiación solar incide de forma perpendicular sobre una superficie en el borde exterior de la atmósfera, tomando la distancia media existente entre la Tierra y el Sol. También es conocida como constante solar, o irradiancia solar total. (Cengel, 2007).

2.2 Dirección de la radiación solar

En la Figura 7 se puede exponer de una manera esquemática la forma en que el Sol altera y controla el movimiento de la Tierra, es decir, la manera en la que la Tierra se traslada alrededor del Sol y simultáneamente ésta rota alrededor de su propio eje. La distancia que existe entre el Sol y la Tierra varía durante todo el año por lo que se consideran un máximo de 152.1×10^6 km el 21 de Junio en el solsticio de verano, que quiere decir que, el Sol está en la parte más norte con respecto a la Tierra; en este evento la duración del día alcanza su máximo; por otro lado, se aprecia la distancia mínima de 147.1×10^6 km el 21 de Diciembre que corresponde al solsticio de invierno, en el cual el Sol está en la parte más sur con respecto a la Tierra. Finalmente, se observa en la Figura 7 que sobre el rango que separa los dos solsticios, existen los equinoccios tanto el 21 de marzo que corresponde a la primavera y el 21 de septiembre que corresponde al otoño, en estas épocas la duración del día es igual a la duración de la noche.



Esto permite concluir que habrá fechas en donde la Tierra recibe una mayor cantidad de radiación, pero la razón principal para que existan las estaciones no es realmente la distancia Sol-Tierra; sino más bien, el ángulo de declinación que existe con respecto al eje del plano orbital de la eclíptica alrededor del Sol. La declinación es la distancia angular de los rayos del sol hacia el norte o hacia el sur del ecuador, en la Figura 9 este ángulo es medido desde la línea central que une Sol-Tierra y su proyección en el plano ecuatorial. La declinación solar puede ser estimada por la siguiente relación en grados (Cooper, 1969):

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \text{Sen} \left[\frac{360(284+n)^\circ}{365} \right] \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde:

δ = Ángulo de declinación; grados sexagesimales.

n = Cualquier día en el año [$1 \leq n \leq 365$]; días. [Siendo 1 enero, primer día del año]

Función que muestra el cambio de la declinación en relación a los días del año

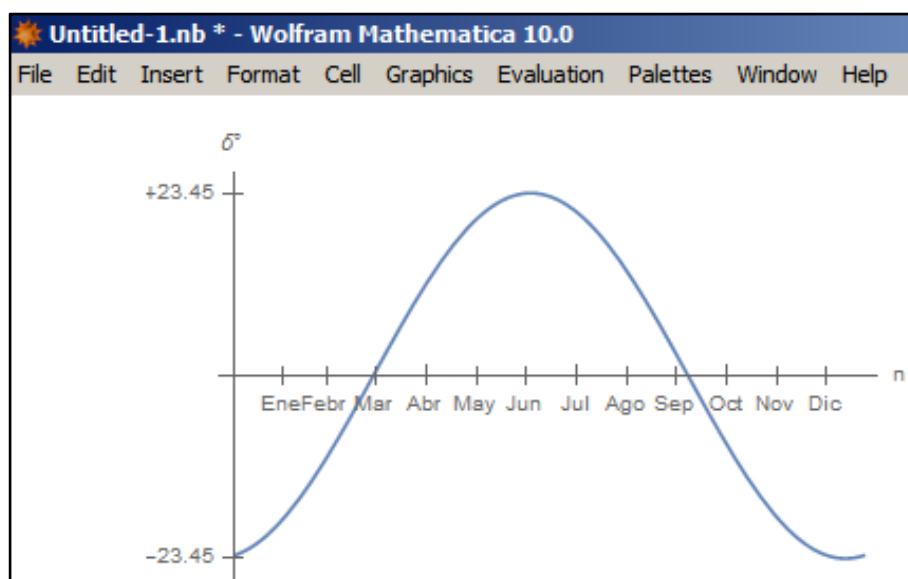
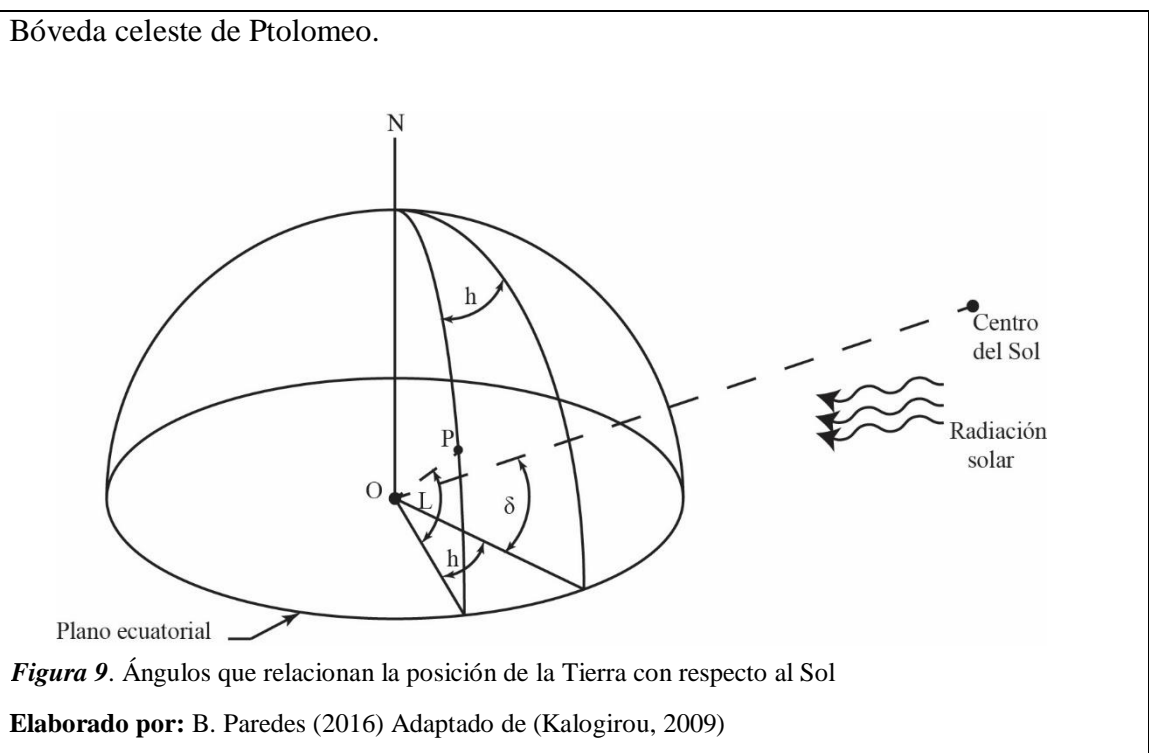


Figura 8. Variación del ángulo de declinación

Elaborado por: B. Paredes (2016)

En la Figura 8 se puede observar la variación del ángulo de declinación con respecto a los días del año, en donde los puntos máximo y mínimo de la gráfica de la función de declinación ocurren tanto en el solsticio de verano en Junio como en el solsticio de invierno en Diciembre, respectivamente. Conocer el ángulo de declinación tiene el mismo valor numérico que la latitud en la cual el sol está directamente elevado al mediodía en un día dado. Sin embargo, se necesita de otros ángulos “fundamentales” para conocer la dirección de la radiación entrante en un determinado lugar.

Primero, se examina el ángulo horario, el cual se define como el ángulo a través del cual la Tierra girará para llevar el meridiano de un punto sobre la superficie terrestre directamente bajo el Sol. En la Figura 9 se muestra el ángulo horario para el punto P, cuyo ángulo es medido sobre el plano ecuatorial entre la proyección de OP y la proyección de la línea entre los centros de la Tierra-Sol.



La forma en que se calcula el ángulo horario es debido a que se conoce que la Tierra en 1 hora se ha desplazado el equivalente a 15° de longitud. Por lo que se utilizará la siguiente ecuación:

$$h = \frac{360^\circ}{24[\text{horas}]} (i)[\text{horas}]$$

$$h = 15^\circ(i) \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:

h = Ángulo horario; grados sexagesimales.

i = Número de horas a partir del mediodía solar; horas.

(-) antes del mediodía y (+) después del mediodía

Debido a factores asociados a la órbita terrestre en relación al Sol, la velocidad orbital de la Tierra varía durante todo el año, de este modo el tiempo solar aparente varía en relación a la hora normal obtenida en un reloj cotidiano. Por lo tanto, se necesita calcular el tiempo solar mediante dos herramientas matemáticas para corregir esta variación que son: la ecuación de tiempo (ET) mostrada en la Figura 9 y la corrección de longitud. Así se obtiene una equivalencia entre el tiempo local estándar y el tiempo solar aparente presentada por (Kalogirou, 2009) donde:

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad \text{[Ecuación 3]}$$

$$B = (n - 81) \frac{360}{364} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde:

ET = Ecuación de tiempo; min

B = Variable en función de n ; grados sexagesimales.

Adicional a esto, la corrección de longitud se aplica mediante la elección de un meridiano para el cálculo del tiempo local estándar, el cual es medido de un meridiano ubicado cerca del centro de una zona horario o desde el meridiano estándar, el de Greenwich el cual tiene una longitud de 0°. A partir de que el Sol demora 4 min en atravesar 1° de longitud. Así se obtiene como lo muestra (Kalogirou, 2009) la ecuación de corrección para el tiempo local estándar y su relación con el tiempo solar aparente:

$$TSA = TLE \pm ET \pm 4(LE - LL) - GD \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde:

TSA = Tiempo solar aparente; min

TLE = Tiempo local estándar; min

LE = Longitud estándar; decimales.

LO = Longitud local; decimales.

GD = Ganancias de luz en el día; min

La ganancia de luz en el día se toma en cuenta debido a que la velocidad orbital de la Tierra aumenta entre los meses de octubre a marzo, por lo que este valor debe ser restado cuando se tome en cuenta este fenómeno.

El desarrollo de la ecuación para la ubicación de este proyecto es la siguiente:

Quito, Ecuador $LO = 78.5^\circ$ y $LE = 75^\circ$

$$\therefore TSA = TLE \pm ET - 4(75 - 78.5)$$

$$TSA = TLE \pm ET + 14 \text{ [min]}$$

La altitud $[\alpha]$ es otro ángulo solar, el cual es medido desde los rayos del sol y un plano horizontal. Este ángulo está relacionado con el zenit $[\Phi]$, ángulo el cual es

medido entre los rayos del sol y la vertical. Para conocer la altitud se aplica la ecuación 6 explicada por (Kalogirou, 2009).

Variación de la ecuación de tiempo durante el año

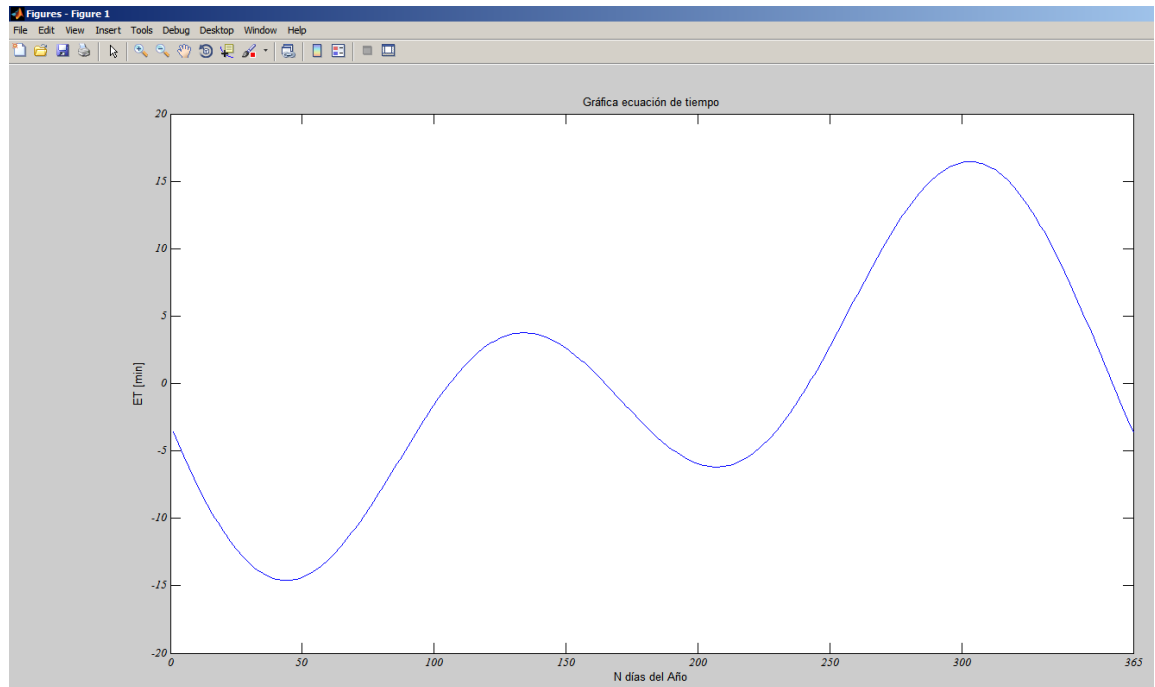


Figura 10. Función de la ecuación de tiempo ET

Elaborado por: B. Paredes (2016)

$$\sin \alpha = \cos \Phi = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos h \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Para el Ecuador: $L=0.21^\circ \approx 0^\circ$

$$\therefore \sin \alpha = \cos \Phi = \sin 0^\circ \sin \delta + \cos 0^\circ \cos \delta \cos h$$

$$\sin \alpha = \cos \Phi = \cos \delta \cos h$$

Donde:

α = Ángulo de altitud; grados sexagesimales.

Φ = Ángulo zenit; grados sexagesimales.

L = Latitud; grados sexagesimales.

Tiempos de salida y puesta del Sol

El Sol sale o se pone cuando $\alpha = 0^\circ$ por lo que se reemplaza en la Ecuación 6.

$$\sin 0^\circ = \cos \delta \cos h_{ss}$$

$$\therefore h_{ps} = -h_{ss}$$

$$h_{ps} = \cos^{-1} \left(\frac{0}{\cos \delta} \right)$$

$$h_{ps} = 90^\circ$$

Donde:

h_{ps} = Ángulo horario para la puesta del Sol; grados sexagesimales.

h_{ss} = Ángulo horario para la salida del Sol; grados sexagesimales.

Debido a que el ángulo horario en el medio día solar local es 0° , con cada 15° de longitud equivalente a 1 h, el tiempo de la salida y puesta del sol en horas desde el mediodía solar local es:

$$H_{ps} = -H_{ss}$$

$$H_{ps} = \frac{1}{15^\circ} \cos^{-1} \left(\frac{0^\circ}{\cos \delta} \right)$$

$$H_{ps} = 6 \text{ [h]}$$

La duración del día (luz solar) es dos veces la hora de la puesta del Sol, debido a que el mediodía solar está en la mitad entre el tiempo de la puesta y la salida del Sol por lo que:

$$DD = \frac{2}{15} \cos^{-1} \left(\frac{0}{\cos \delta} \right) \quad \text{[Ecuación 7]}$$

$$DD = 12 \text{ [h]}$$

Donde:

DD= Duración de luz solar; h

En la Figura 11 se encuentra la variación del ángulo de altitud con respecto a la variación del ángulo horario. En el cual la tendencia de valores experimenta un crecimiento o decrecimiento mientras más se aleja el ángulo horario del medio día solar según la ecuación 2. Ahora bien, el ángulo de altitud alcanza su máximo en el medio día solar de cualquier día del año y sus mínimos tanto en la puesta como en la salida del sol.

Variación del ángulo altitud con respecto al ángulo horario

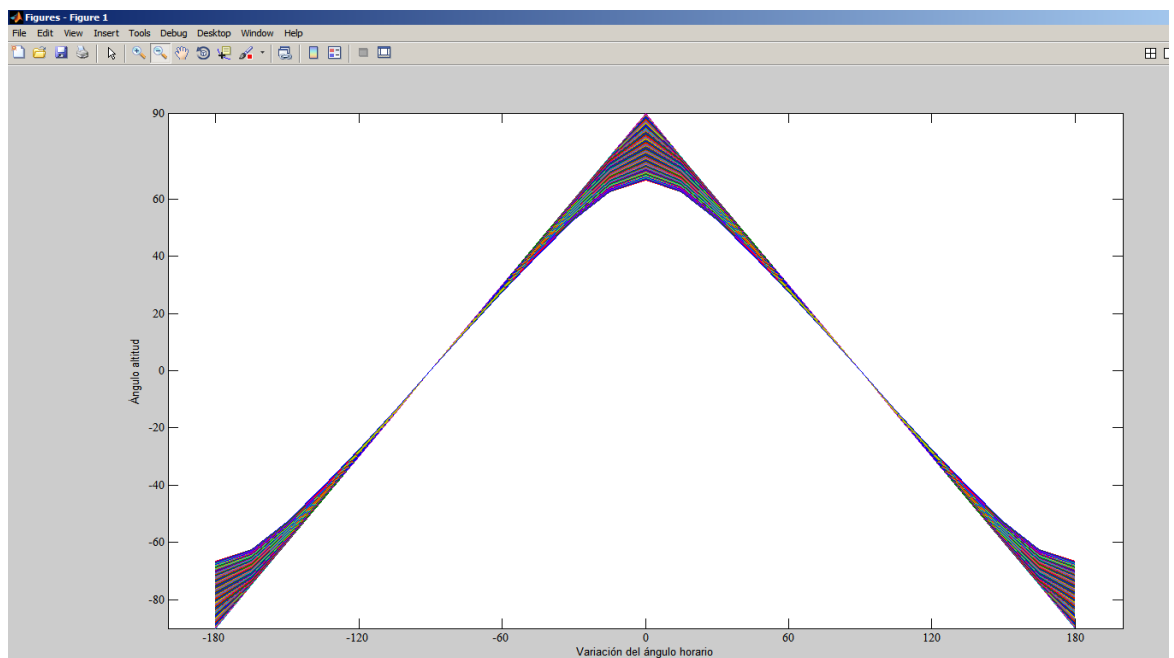


Figura 11. Gráfica ángulo altitud vs. Ángulo horario

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Asociado a esto está el ángulo solar azimut $[Z]$ es el ángulo medido en el plano horizontal directamente desde el sur para el hemisferio norte y directamente desde el norte para el hemisferio sur. La expresión matemática para su cálculo (ASHRAE, 1975) es:

$$\sin Z = \frac{\cos \delta \cdot \sin h}{\cos \alpha} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

Donde:

Z = Ángulo azimut; grados sexagesimales.

El ángulo de incidencia es el ángulo entre los rayos del Sol y la normal sobre una superficie. En la Figura 12 se muestra los ángulos fundamentales que indican la dirección de la radiación solar sobre un plano inclinado, siendo $[Z_s]$ el ángulo azimut con respecto a la superficie inclinada, para superficies orientadas al este del sur y $[\beta]$ el ángulo de inclinación de la superficie con respecto al plano horizontal, en donde en función del ángulo de incidencia se puede transcribir en la ecuación obtenida por (Duffie & Beckman, 2013) y (Kreith & Kreider, 1978) con relación a los ángulos que la componen, por lo que:

$$\cos \theta = \cos \alpha \cos(Z - Z_s) \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Donde:

θ = Ángulo de incidencia; grados sexagesimales.

Z_s = Ángulo azimut de la superficie inclinada; grados sexagesimales.

β = Ángulo de inclinación con respecto al plano horizontal; grados sexagesimales. Cuya variación generalmente está entre $[0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ]$.

Ángulos fundamentales de dirección Sol-Observador sobre una superficie inclinada

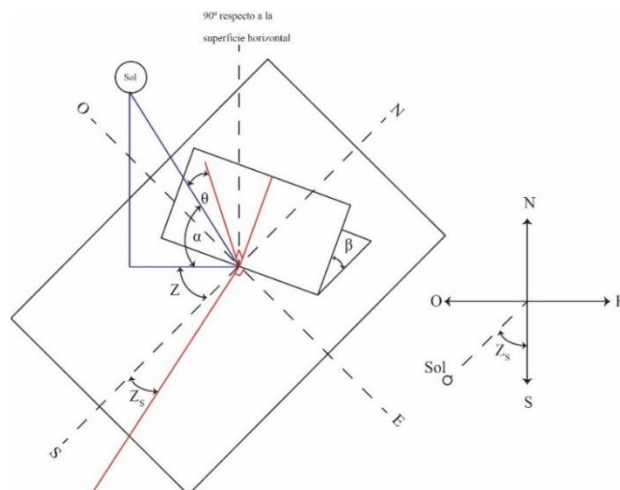


Figura 12. Dirección de la radiación sobre una superficie inclinada

Elaborado por: B. Paredes (2016) Adaptado de (Goswami, 2015) (Kalogirou, 2009)

Para el cálculo del ángulo Azimut y por tanto, el ángulo de incidencia se tomarán los datos de los dos solsticios y los dos equinoccios. Para lo cual se procede a mostrar la Tabla 6:

Tabla 6.

Características de equinoccios primavera-otoño y solsticios verano-invierno

Características Quito	Equinoccio primavera	Solsticio verano	Equinoccio otoño	Solsticio invierno
Día-Mes-2016	21-Marzo	21-Junio	21-Septiembre	21-Diciembre
n	81	173	265	356
ET	-7.53	-1.7105	8.2582	0.5583
Tiempo solar	TLE + 6.47	TLE + 12.2895	TLE + 22.2582	TLE + 14.5583
δ	0°	23.4480°	-0.6054°	-23.4446°
I[W/m²]	1024.03	984.93	1082.52	977.17

Nota: Los valores en esta tabla fueron obtenidos al aplicar las ecuaciones presentadas previamente.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Tabla 7.

Variación ángulo: horario, altitud, azimut utilizando las características anteriores

		Variación ángulos altitud α vs horario h				Variación ángulo Azimut Z			
Horas día	Ángulo h	Ángulo altitud α							
		21-mar	21-jun	21-sep	21-dic	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄
-12	-180	-90	-66.6	-89.4	-66.6	-	0.00	0.00	0.00
-11	-165	-75	-62.4	-75.0	-62.4	-90	-30.83	-87.66	-30.83
-10	-150	-60	-52.6	-60.0	-52.6	-90	-49.06	-88.79	-49.06
-9	-135	-45	-40.4	-45.0	-40.4	-90	-58.48	-89.14	-58.48
-8	-120	-30	-27.3	-30.0	-27.3	-90	-63.40	-89.30	-63.40
-7	-105	-15	-13.7	-15.0	-13.7	-90	-65.82	-89.37	-65.82
-6	-90	0	0.0	0.0	0.0	-90	-66.55	-89.39	-66.56
-5	-75	15	13.7	15.0	13.7	-90	-65.82	-89.37	-65.82
-4	-60	30	27.3	30.0	27.3	-90	-63.40	-89.30	-63.40
-3	-45	45	40.4	45.0	40.4	-90	-58.48	-89.14	-58.48
-2	-30	60	52.6	60.0	52.6	-90	-49.06	-88.79	-49.06
-1	-15	75	62.4	75.0	62.4	-90	-30.83	-87.66	-30.83
0	0	90	66.6	89.4	66.6	-	0.00	0.00	0.00
1	15	75	62.4	75.0	62.4	90	30.83	87.66	30.83
2	30	60	52.6	60.0	52.6	90	49.06	88.79	49.06
3	45	45	40.4	45.0	40.4	90	58.48	89.14	58.48
4	60	30	27.3	30.0	27.3	90	63.40	89.30	63.40
5	75	15	13.7	15.0	13.7	90	65.82	89.37	65.82
6	90	0	0.0	0.0	0.0	90	66.55	89.39	66.56
7	105	-15	-13.7	-15.0	-13.7	90	65.82	89.37	65.82
8	120	-30	-27.3	-30.0	-27.3	90	63.40	89.30	63.40
9	135	-45	-40.4	-45.0	-40.4	90	58.48	89.14	58.48
10	150	-60	-52.6	-60.0	-52.6	90	49.06	88.79	49.06
11	165	-75	-62.4	-75.0	-62.4	90	30.83	87.66	30.83
12	180	-90	-66.6	-89.4	-66.6	-	0.00	0.00	0.00

Nota: El “0” corresponde al mediodía solar.**Elaborado por:** B. Paredes (2016)

Se reemplaza los siguientes ángulos como datos en la ecuación 9 para de esta manera obtener los valores del ángulo de incidencia. Para un valor de $Z_s = 0^\circ$ y $\beta = 30^\circ$ dependiendo de la disposición del sol durante las horas de luz solar pueden variar; y por lo tanto, la disposición del colector también lo hará, según el sistema de seguimiento solar.

En la Tabla 8 se puede apreciar los diferentes valores para el ángulo de incidencia, en donde se puede concluir que en los meses de marzo y septiembre los

valores de incidencia para diferentes horas del día llegan a tener un valor casi análogo, lo cual es verdad para los meses de junio y diciembre. Esto es porque el ángulo de altitud; y por tanto, el ángulo azimut; están prácticamente en función del ángulo de declinación correspondiente a cada mes y día de año en $L = 0^\circ$.

Tabla 8.

Ángulo de incidencia cuando $\beta = 0^\circ$ y cuando $\beta = 30^\circ$.

Variación ángulo Incidencia θ para $\beta = 0^\circ$				Variación ángulo Incidencia θ para $\beta = 30^\circ$			
θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	78.52	89.70	78.53
75.00	76.26	75.00	76.26	77.05	66.13	76.74	66.14
60.00	62.70	60.00	62.70	64.34	53.40	64.01	53.40
45.00	49.56	45.00	49.55	52.24	40.47	51.86	40.47
30.00	37.39	30.01	37.39	41.41	27.50	40.95	27.50
15.00	27.61	15.01	27.60	33.23	14.90	32.67	14.90
-	23.45	0.61	23.44	-	6.55	29.39	6.56
15.00	27.61	15.01	27.60	33.23	14.90	32.67	14.90
30.00	37.39	30.01	37.39	41.41	27.50	40.95	27.50
45.00	49.56	45.00	49.55	52.24	40.47	51.86	40.47
60.00	62.70	60.00	62.70	64.34	53.40	64.01	53.40
75.00	76.26	75.00	76.26	77.05	66.13	76.74	66.14
90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	78.52	89.70	78.53
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Los campos sin dato “-” corresponden al rango fuera de las horas de brillo o luz solar

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Radiación solar extraterrestre

La radiación solar extraterrestre $[I]$ es la que llega a la Tierra sin ningún tipo de atenuación a través del espacio. Según la siguiente fórmula matemática dada por

(Duffie & Beckman, 2013) es claro que está influenciado por la distancia Tierra-Sol en determinada época del año.

$$I = I_0 \left[1 + 0.034 \left(\cos \left(\frac{360 \cdot n}{365.25} \right) \right) \right] \quad \text{[Ecuación 10]}$$

Donde:

I = Radiación solar extraterrestre; $\frac{W}{m^2}$

I_0 = Constante solar; $\frac{W}{m^2}$

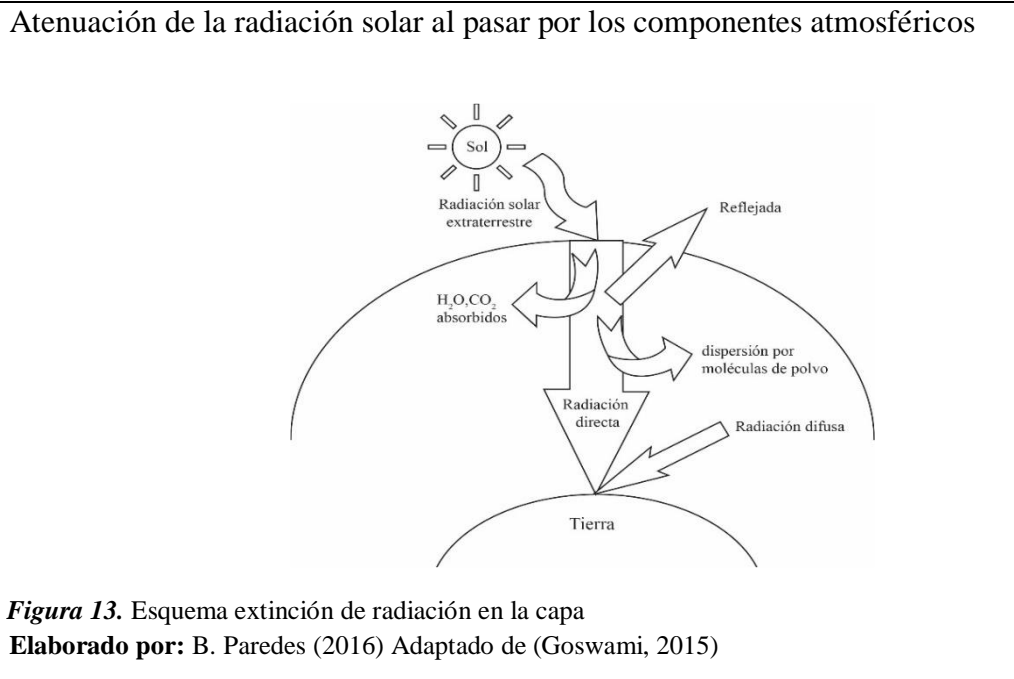
Los valores de $[I]$ calculados para los dos equinoccios y los dos solsticios respectivamente se muestran en la Tabla 6.

2.3 Radiación solar total

El concepto de radiación solar total nace a partir de conocer que no toda la radiación que viaja a través del espacio es consumida por nuestro planeta. Esto es debido a que la radiación sufre una atenuación considerable al entrar en contacto con la atmósfera terrestre como se menciona en la investigación de (Quitiaquez Sarzosa, 2015). La radiación solar total consta de radiación directa y radiación difusa: La radiación directa es la parte de la radiación total que no ha sido absorbida ni tampoco dispersada por los componentes de la atmósfera. Mientras que la radiación difusa es la parte de la radiación total que es mitigada. La explicación a esto último es que la atmósfera está compuesta de gases cuya interacción producen el fenómeno de absorción de radiación.

Como se muestra en el esquema de la Figura 13. Ejemplos de estos gases son el O_3 (ozono), O_2 , CO_2 , H_2O . Pero no solo este fenómeno se produce; sino que, además las moléculas de aire, junto con el smog y otras partículas provenientes de la

contaminación ambiental reflejan la radiación entrante y por tanto, disminuye aún más la cantidad que ingrese en la superficie terrestre.



2.4 Declive de la radiación solar en la atmósfera terrestre

La radiación solar extraterrestre $[I]$ llega a la atmósfera terrestre en donde sufre una atenuación afectada por la absorción, dispersión y reflexión. Para lo cual se obtiene un valor de radiación directa normal $[I_d]$ a la superficie terrestre y un valor de radiación difusa $[I_{dif}]$, los cuales para este proyecto son necesarios ser calculados para una superficie inclinada. Para esto se consideran los ángulos de la Figura 12. La siguiente ecuación muestra el análisis completo de cálculo de radiación total terrestre $[I_c]$ sobre una superficie inclinada.

$$I_c = I_{d,c} + I_{dif,c} + I_{r,c} \quad \text{[Ecuación 11]}$$

La expresión anterior trata sobre la sumatoria de la radiación solar que choca contra una superficie inclinada. Para lo cual se considera la radiación directa, la radiación difusa y además la radiación solar reflejada sobre el suelo [$I_{r,c}$] (Kalogirou, 2009). Lo siguiente es reemplazar cada uno de los términos de la ecuación 11 y se substituye tomando en cuenta los ángulos fundamentales de la Figura 12 con lo cual se tiene que:

$$I_c = I_{d,N} \cos \theta + I_{dif,H} \frac{(1+\cos \beta)}{2} + I_H \rho \frac{(1-\cos \beta)}{2} \quad \text{[Ecuación 12]}$$

En la ecuación 12 se observa que la corrección utilizando los ángulos para una superficie inclinada fue efectuada, por lo cual lo que queda es, determinar los valores de la radiación directa, normal al plano y la radiación difusa, sobre el plano horizontal multiplicada por el factor de visión, que es el porcentaje de reflectividad sobre una superficie, en este caso el suelo, también conocido como albedo. Lo cual se reemplaza en la siguiente expresión:

$$I_c = I e^{-\tau_d m^d} \cos \theta + I e^{-\tau_{dif} m^{dif}} \frac{(1+\cos \beta)}{2} + I_H \rho \frac{(1-\cos \beta)}{2} \quad \text{[Ecuación 13]}$$

$$m \approx \frac{1}{\sin \alpha}$$

Donde:

$$I_c = \text{Radiación total}; \frac{W}{m^2}$$

m = Longitud de camino que recorren los rayos solares a través de la atmósfera.

τ_d, τ_{dif} = Espesores ópticos de radiación directa y difusa; adimensional.

d, dif = Exponentes de masa de aire para radiación directa y difusa; adimensional.

$$d = 1.219 - 0.043\tau_d - 0.151\tau_{dif} - 0.204\tau_d\tau_{dif} \quad [\text{Ecuación 14}]$$

$$dif = 0.202 + 0.852\tau_d - 0.007\tau_{dif} - 0.357\tau_d\tau_{dif} \quad [\text{Ecuación 15}]$$

Tabla 9.

Valor mensual de espesor óptico $[\tau_d, \tau_{dif}]$ y exponente de masa de aire $[d, dif]$

Loc: Quito Lat:0.13S Long:78.48E Elev:2812 m												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
τ_d	0.379	0.394	0.370	0.338	0.309	0.300	0.301	0.323	0.344	0.352	0.375	0.381
τ_{dif}	2.610	2.510	2.548	2.587	2.616	2.602	2.579	2.520	2.514	2.594	2.601	2.592
d	0.6068	0.6213	0.6260	0.6355	0.6458	0.6540	0.6583	0.6585	0.6482	0.6259	0.6111	0.6098
dif	0.1535	0.1671	0.1628	0.1597	0.1584	0.1607	0.1633	0.1690	0.1688	0.1578	0.1551	0.1559

Nota: Los valores mensuales están en gran manera relacionados a las condiciones meteorológicas.

Fuente: (ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI), 2013)

El proyecto es diseñado para ser utilizado en hogares, conjuntos habitacionales o en ambientes dentro del área urbana de Quito, en donde la mayor parte de las superficies de las estructuras y construcciones en los patios, e instalaciones al aire libre están hechas de concreto y hormigón.

Para lo cual se elige el índice de reflectividad para este tipo de superficie, en este caso la cocina se va a posicionar sobre un suelo de hormigón degradado que posee un valor de reflectividad $\rho = 0.22$, para césped el valor es de $\rho = 0.26$.

Para otros tipos de suelo en la Tabla 10 se muestra un listado con sus valores respectivos.

Tabla 10.

Valores para la reflectividad del suelo o albedo

Surface	Average Reflectivity
	0.75
1. Snow (freshly fallen or with ice film)	0.07
2. Water surfaces (relatively large incidence angles)	0.14
3. Soils (clay, loam, etc.)	0.04
4. Earth roads	0.07
5. Coniferous forest (winter)	0.26
6. Forests in autumn, ripe field crops, plants	0.10
7. Weathered blacktop	0.22
8. Weathered concrete	0.30
9. Dead leaves	0.20
10. Dry grass	0.26
11. Green grass	0.13
12. Bituminous and gravel roof	0.20
13. Crushed rock surface	0.27
14. Building surfaces, dark (red brick, dark paints, etc.)	0.27
15. Building surfaces, light (light brick, light paints, etc.)	0.60

Nota: Se eligió el concreto degradado por ser el que más se exhibe en el área urbana.

Elaborado por: B. Paredes (2016) Adaptado de (Hunn & Calafell, 1977)

Lo siguiente es evaluar la ecuación 12 con los valores escogidos de la Tabla 9 y 10, como los valores obtenidos al reemplazar los datos de los ángulos fundamentales como la altitud, el azimut en las fechas de marzo, junio, septiembre y diciembre. De esta manera, se obtiene los valores de la radiación total terrestre $[I_c]$ en $[W / m^2]$ que parten desde el mediodía solar y varía según la hora del día desde la salida del sol $H_{ss} = -6$ h hasta la puesta del sol a las $H_{ps} = +6$ h.

Tabla 11.

Valores de la radiación total terrestre sobre un plano

Horas día	$\beta = 0^\circ$				$\beta = 30^\circ$			
	Ic ₁	Ic ₂	Ic ₃	Ic ₄	Ic ₁	Ic ₂	Ic ₃	Ic ₄
-12	-	-	-	-	-	-	-	-
-11	-	-	-	-	-	-	-	-
-10	-	-	-	-	-	-	-	-
-9	-	-	-	-	-	-	-	-
-8	-	-	-	-	-	-	-	-
-7	-	-	-	-	-	-	-	-
-6	-	-	-	-	-	-	-	-
-5	206.94	194.89	211.12	188.58	186.78	297.32	193.59	283.03
-4	469.39	438.75	478.79	428.03	417.36	549.06	429.78	533.35
-3	711.09	660.95	723.98	650.08	628.80	760.41	644.84	746.40
-2	902.16	835.73	917.26	826.04	795.72	921.95	814.03	910.34
-1	1024.03	946.81	1040.36	938.53	902.06	1023.44	921.62	1013.70
0	-	984.93	1082.52	977.17	-	1058.09	958.50	1049.02
1	1024.03	946.81	1040.31	938.53	902.06	1023.44	921.62	1013.70
2	902.16	835.73	917.18	826.04	795.72	921.95	814.03	910.34
3	711.09	660.95	723.98	650.08	628.80	760.41	644.84	746.40
4	469.39	438.75	478.79	428.03	417.36	549.06	429.78	533.35
5	206.94	194.89	211.12	188.58	186.78	297.32	193.59	283.03
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Se obtuvo valores de radiación total para dos ángulos diferentes medidos desde el plano.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

2.5 Transferencia de calor sobre un concentrador parabólico

Los fundamentos de la radiación térmica establecen que cuando la radiación choca contra un objeto en el espacio una fracción de la radiación incidente es reflejada, otra absorbida y otra transmitida. Por lo cual, se tiene tres componentes que son la reflectividad, la absorptividad y transmisividad respectivamente. Los cuales

según la primera ley de la termodinámica deben ser iguales a la unidad, explicado por (Goswami, 2015).

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad \text{[Ecuación 16]}$$

Donde:

α = Absortividad; adimensional.

τ = Transmisividad; adimensional.

ρ = Reflectividad; adimensional.

Tipos de reflexión de la radiación

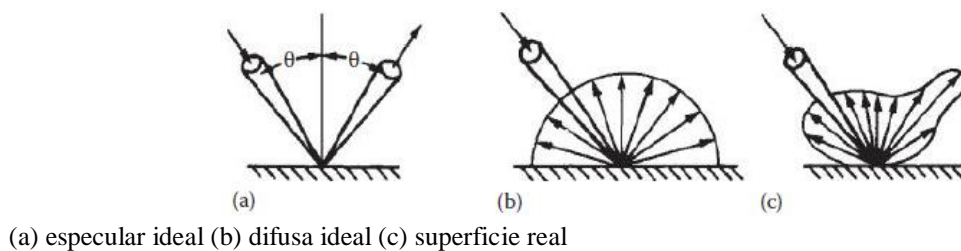


Figura 14. Reflexión de la radiación

Fuente: (Goswami, 2015)

La reflexión de la radiación puede ser especular o difusa. (Duffie & Beckman, 2013), mencionan que la reflexión es especular cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, mientras que cuando la radiación reflejada está distribuida uniformemente en todas direcciones se le denomina difusa. En la naturaleza no existe una superficie con ambas características; aún así, mientras una superficie sea más rugosa tiene mayor reflexión difusa, al contrario que mientras más pulida sea una superficie se acerca bastante a una reflexión especular. Ahora bien, para un sistema de colector solar se tiene que decidir por una superficie especial llamadas superficies selectivas, la cual para este proyecto es una superficie selectiva con propiedades para reflejar, esta superficie necesita de materiales y acabados que puedan reflejar la mayor cantidad posible de calor radiante, para lo cual necesitan un

valor alto de reflexión especular, estos valores altos se los puede encontrar en superficies altamente pulidas o con recubrimientos especiales para el metal del cual fue hecho el concentrador. Uno de los materiales más parecidos en la naturaleza y que se acerquen a una superficie especular perfecta es el espejo. Como se puede verificar en la Tabla 12 en donde el espejo tiene un índice de reflectividad [ρ] de 0.94.

Tabla 12.

Valores de reflectividad especular para materiales solares de reflexión

Specular Reflectance Values for Solar Reflector Materials	
Material	ρ
Silver (unstable as front surface mirror)	0.94 ± 0.02
Gold	0.76 ± 0.03
Aluminized acrylic, second surface	0.86
Anodized aluminum	0.82 ± 0.05
Various aluminum surfaces, range	$0.82 - 0.92$
Copper	0.75
Back-silvered water-white plate glass	0.88
Aluminized type-C Mylar (from Mylar side)	0.76

Nota: Se utilizó el valor de 0.76 por ser el más cercano al Inox. AISI 430 Brillante

Fuente: (Goswami, 2015)

Para encontrar la eficiencia de un concentrador parabólico se necesita conocer además el valor de la absorptividad [α] del material en el receptor, es decir que influye en gran manera tanto el material escogido para el soporte como para el recipiente en el receptor o recibidor. Estos dos elementos tienen que ser escogidos cumpliendo las siguientes condiciones: Que en el receptor se utilice un material que posea un porcentaje alto de absorptividad; el material del recipiente ubicado en el receptor posea una buena conductividad térmica; la transmitividad del recipiente sea casi

nula. Para que se cumplan estas condiciones se puede aplicar un recubrimiento de pintura de color negro, debido a que como se puede observar en la Tabla 13 el valor de $[\alpha] = 0.90$ es alto, por lo que su relación con la emisividad es de $\alpha/\varepsilon = 0.95$

Tabla 13.
Relación de emisividad y absorptividad

Surface material	Emissivity at atmospheric temperatures	Solar absorptivity
Highly polished “White” metals, gold, yellow brass	0.02 – 0.08	0.1 – 0.4
Clean, “dark” metals	0.1 – 0.35	0.3 – 0.6
Metallic-pigment paints	0.35 – 0.55	0.4 – 0.6
White, non-metal surfaces	0.7 – 0.9	0.1 – 0.35
Dark-colored non-metals	0.7 – 0.9	0.45 – 0.8
Black paint, asphalt, carbon, water	0.85 – 0.95	0.7 – 0.9

Nota: Se eligió el recubrimiento de pintura negra para el recipiente en el receptor.

Fuente: (Bolz & Tuve, 1970)

El objetivo de implementación de un concentrador parabólico es la de concentrar sobre su superficie la mayor cantidad de radiación y a la par reflejar esta radiación sobre el receptor o receptor. Si se conoce que la transferencia de calor se establecerá entre las superficies tanto del concentrador como del receptor, es necesario conocer la relación entre sus dos áreas respectivamente. La fórmula matemática que relacione el área de apertura del concentrador y el área del receptor se le llama relación de concentración geométrica:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad \text{[Ecuación 17]}$$

Esta ecuación es válida para un concentrador parabólico con receptor circular (PTC), este tipo de concentradores suelen ser tubulares por donde transita el fluido de trabajo.

Esta relación da paso para contestar una interrogante, la cual plantea la necesidad de conocer los límites termodinámicos del concentrador, en donde se toma en cuenta la fuente, que en este caso sería el Sol, el concentrador y el receptor. Para lo cual se tiene que definir el ángulo de aceptación $2\theta_{\max}$ el cual según lo explica (Duffie & Beckman, 2013) es el ángulo máximo al cual la luz procedente de la fuente puede ser captada, el ángulo medio de aceptación tiene un valor de 0.267° , por lo tanto el ángulo de aceptación es de 0.53° La siguiente ecuación muestra el cálculo del diámetro del receptor, cuando el receptor tiene forma plana

$$\phi_r = \frac{W_a \sin \theta}{\sin \phi_r \cos(\phi_r + \theta)} \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Donde:

W_a = Apertura de la parábola; mm

ϕ_r = Diámetro del receptor; mm

ϕ_r = Ángulo de borde; grados sexagesimales.

θ = Ángulo medio de aceptación; grados sexagesimales.

En el apartado sobre el principio de funcionamiento se esbozó que se necesitaba implementar una cocina solar parabólica que cumpla con calentar un volumen de 4 L en un tiempo de 90 min. Para el cálculo del volumen del recipiente se tomará en cuenta una olla casera con forma cilíndrica en donde se aplicará la siguiente ecuación para hallar dicho volumen:

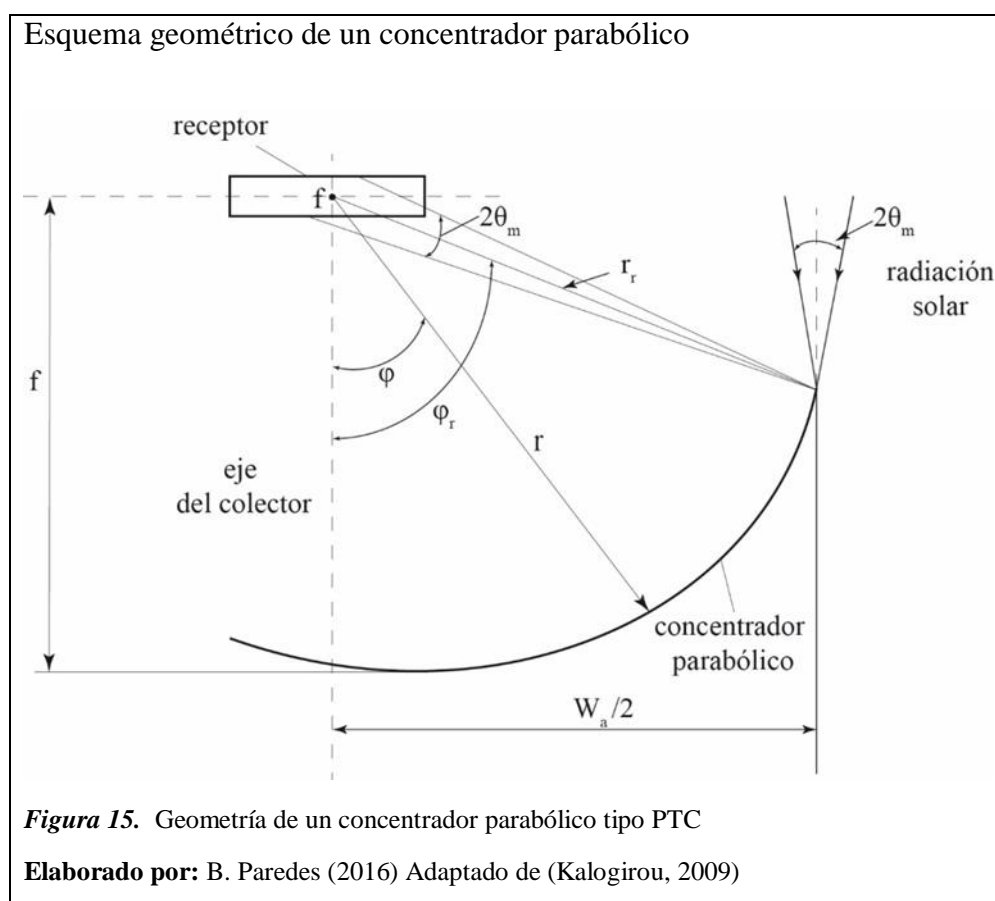
$$V = \frac{\pi}{4} h (D_R^2 - d_R^2) \quad \text{[Ecuación 19]}$$

Según la Figura 15 se puede obtener fórmulas matemáticas debido a las relaciones geométricas existentes entre la radiación incidente, el concentrador parabólico y el receptor que se encuentra en el foco; por lo que, se reemplazarán los datos de la Tabla 13 propuestos según las necesidades del proyecto para calentar el volumen

requerido. Al tener una geometría parabólica se necesita utilizar la expresión matemática que representa esta curva en un sistema coordenado. En donde las coordenadas para el vértice está en (0,0) y para el foco es en (0, f).

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad \text{[Ecuación 20]}$$

La ecuación de la parábola muestra que la curva está en sentido vertical, además de que se abre hacia arriba.



Se observa que a pesar la reflexión siempre es puntual en el punto focal [f].

Tabla 14.

Valores propuestos para el diseño del concentrador parabólico

Datos	Valor	Unidad
Apertura	1600	mm
Receptor	240	mm

Nota: Estos datos se proponen para analizar cómo afecta el área del receptor al área de apertura.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Por lo que se reemplaza en la ecuación 17 y se resuelve la ecuación 18, con lo que se obtiene que:

$$\varphi_r = 60^\circ$$

$$C = \frac{\pi \left(\frac{W_a}{2} \right)^2}{\pi \left(\frac{\varnothing_r}{2} \right)^2}$$

$$C = \frac{W_a^2}{\varnothing_r^2}$$

$$C = \frac{1600^2}{240^2}$$

$$C = 44.44$$

Este valor de la relación de concentración pone en evidencia que los valores de temperatura pueden estar entre los 60°C y 400°C, según lo mencionado en la Tabla 4. Ahora bien, para hallar la apertura $[W_a]$ se relaciona la trigonometría presente en la Figura 15, la cual en función del ángulo de borde con un valor de foco f .

$$W_a = 4 \cdot f \cdot \tan \left(\frac{\varphi_r}{2} \right) \quad \text{[Ecuación 21]}$$

$$f = \frac{W_a}{4 \cdot \tan \left(\frac{\varphi_r}{2} \right)}$$

$$f = \frac{1600}{4 \cdot \tan(30^\circ)}$$

$$f = 692.82 \text{ [mm]}$$

Donde:

f = Foco de la parábola; mm

El radio $[r]$ es la relación entre el ángulo $[\varphi]$ formado por el eje del foco y un haz de luz reflejado hacia el receptor desde la curvatura del concentrador parabólico.

$$r = \frac{2 \cdot f}{1 + \cos(\varphi)} \quad \text{[Ecuación 22]}$$

La ecuación es la representación de que mientras el ángulo $[\varphi]$ varía desde 0 en el eje del foco hasta el extremo del concentrador parabólico en el ángulo de borde $[\varphi_r]$, el radio $[r]$ también variará del mismo modo desde cuando $[r] = [f]$ hasta un valor $[r_r]$ que está en función del ángulo de borde $[\varphi_r]$. Por lo que:

$$r_r = \frac{2 \cdot f}{1 + \cos(\varphi_r)}$$

$$r_r = \frac{2(692.82)}{1 + \cos(60^\circ)}$$

$$r_r = 923.76 \text{ [mm]}$$

Una de las características importantes de la parábola es el *latus rectum* o lado recto $[Lr]$, el cual es paralelo a la directriz o al eje x en el caso de la ecuación, en cuyo caso se tiene que cumplir que $[\varphi] = 90^\circ$ por lo que $Lr = W_{aLr}$

$$Lr = W_{aLr} = 4f \cdot \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad \text{[Ecuación 23]}$$

$$Lr = 4(692.82) \tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right)$$

$$L_r = 2771.28 \text{ [mm]}$$

La longitud de la curva sobre la superficie reflectora del concentrador está dada por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{L_r}{2} \left\{ \sec\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) \cdot \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) + \ln \left| \sec\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) + \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) \right| \right\} \quad \text{[Ecuación 24]}$$

$$S = \frac{2771.28}{2} \left\{ \sec\left(\frac{60^\circ}{2}\right) \cdot \tan\left(\frac{60^\circ}{2}\right) + \ln \left| \sec\left(\frac{60^\circ}{2}\right) + \tan\left(\frac{60^\circ}{2}\right) \right| \right\}$$

$$S = 1385.64(0.6666 + 0.5493)$$

$$S = 1684.80 \text{ [mm]}$$

2.6 Eficiencia óptica del concentrador parabólico

La eficiencia óptica de un concentrador parabólico se indica a continuación en función de los siguientes parámetros:

Tabla 15.

Valores que definen la eficiencia geométrica del concentrador

Parámetro	Nomenclatura	Cantidad
Reflectividad del paraboloide	ρ	0.76
Transmitividad del recubrimiento sobre el receptor	τ	-
Absortividad recubrimiento sobre el receptor	α	0.7
Factor de forma	F	0.977

Nota: La tabla 15 se muestra un compendio de los valores tomados para calcular la eficiencia óptica.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

$$\eta_0 = \rho \cdot \alpha \cdot \tau \cdot F \quad \text{[Ecuación 25]}$$

Donde:

η_0 = Eficiencia óptica del concentrador parabólico; adimensional.

$$F = \frac{A_s}{A_a} \quad [\text{Ecuación 26}]$$

Donde:

A_s = Representa la fracción del área de apertura del concentrador que no es afectado por la sombra del receptor.

$$A_s = A_a - A_r \quad [\text{Ecuación 27}]$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} (W_a^2 - \phi_r^2)$$

$$A_s = 1.965 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\therefore F = \frac{1.965}{2.0106}$$

$$F = 0.977$$

Se reemplaza los datos de la Tabla 15 en la ecuación 25 y se tiene que:

$$\eta_0 = 0.52(100) = 52\%$$

2.7 Calor ganado y eficiencia térmica del colector

Lo siguiente es averiguar la ganancia de calor sobre el receptor, para lo cual se calcula la absorción de calor en el concentrador parabólico y a este se le resta las pérdidas de calor por transferencia calor en el receptor. Según la ecuación proporcionada por (Li, He, & Wang, 2011) se tiene que:

$$q_c = {}^*I_c \cdot A_a \cdot \eta_0 - A_r [h_c(T_r - T_\infty) + \epsilon_c \cdot \sigma(T_r^4 - T_\infty^4)] \quad [\text{Ecuación 28}]$$

Donde:

*I_c = La cantidad de radiación incidente se toma para el medio día solar del 21 de septiembre, dato mostrado en la Tabla 6 se escoge su valor máximo; $\frac{W}{m^2}$

h_c = Coeficiente convectivo de transferencia de calor; $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

T_r = Temperatura en el receptor; K

T_∞ = Temperatura ambiente; K

ϵ_c = Factor de emisividad del colector; adimensional.

σ = Constante de Stefan-Boltzman; $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

En el término de la diferencia en la ecuación 28 se toma en cuenta la pérdida de calor por transferencia de calor tanto por convección y radiación al estar en contacto directo con el aire circundante, por lo que se necesita conocer $[h_c]$ conocido como el coeficiente convectivo de transferencia de calor y para determinar su valor se recurre a los parámetros adimensionales del número de Reynolds y también el de Nusselt $[Nu]$. Por lo que se tiene lo siguiente:

$$Re = \frac{\xi \cdot V \cdot \phi_r}{\mu} \quad \text{[Ecuación 29]}$$

Donde:

Re = Número de Reynolds; adimensional.

ξ = Densidad del fluido de trabajo; $\frac{kg}{m^3}$

V = Velocidad del viento; $\frac{m}{s}$

μ = Viscosidad dinámica del fluido; $\frac{kg}{m \cdot s}$

$$Re = \frac{(0.8707)(3.5)(0.25)}{1.7996 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 42335.10224$$

La velocidad media anual del viento $[V]$ en Quito a 30[m] de altura sobre el suelo según el (Ministerio de electricidad y energía renovable, 2013) es de: $V = 3.5$ [m/s], con datos de presión de aire a 0.7 atmósferas [atm] dado por (Agencia Espacial Civil

Ecuatoriana a la Comunidad, 2013), la densidad del aire a $[T_{\infty}] = 14.5^{\circ}\text{C}$ al aplicar la ecuación general de los gases ideales es $\rho = 0.8707 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

$$\xi = \frac{P \cdot m}{R \cdot T_{\infty}} \quad \text{[Ecuación 30]}$$

Donde:

$$\xi = \text{Densidad del aire; } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P = \text{Presión del aire como gas ideal; kPa}$$

$$R = \text{Constante de los gases; } \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{kg}}$$

$$Nu = \frac{h_c \cdot \phi_r}{k} \quad \text{[Ecuación 31]}$$

Donde:

$$Nu = \text{Número de Nusselt; adimensional.}$$

$$k = \text{Conductividad térmica; } \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Además, según (McAdams, 1954) también se tiene como válidas las ecuaciones para el flujo de aire alrededor de una superficie circular en un ambiente exterior o al “aire libre”:

$$Nu = \begin{cases} 0.40 + 0.54 \cdot Re^{0.52} & \text{para } 0.1 < Re < 1000 \\ 0.30 \cdot Re^{0.6} & \text{para } 1000 < Re < 50\,000 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{[Ecuación 32]} \\ \text{[Ecuación 33]} \end{matrix}$$

Del resultado de la ecuación 29 se concluye que:

$Re = 42335.10 \therefore 1000 < Re < 50\,000$. Por lo que se reemplaza en la ecuación 32:

$$Nu = 0.30(42335.10^{0.6})$$

$$Nu = 179.119$$

Se reemplaza este valor de [Nu] en la ecuación 31:

$$h_c = \frac{(Nu)k}{\phi_r}$$

$$h_c = \frac{(179.119)(0.024723)}{0.25}$$

$$h_c = 17.71 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

La temperatura media en el receptor puede ser estimada para un valor promedio de $[T_r] = 400^\circ\text{C}$, según los valores experimentales conseguidos por (Parry, Solar Cooker at Cantina West, 2015) de 440.56°C y los indicados por (Kalogirou, 2009) en la Tabla 4. Para lo cual se reemplaza los datos obtenidos en la ecuación 28:

$$q_c = (1082.52)(2.01)(0.52) - (0.04523)[(17.71)(673.15 - 287.65) + ((0.85)(5.670 \times 10^{-8})(673.15^4 - 287.65^4)]$$

$$q_c = 1131.45 - (0.04523)[(6827.21) + (9565.81)]$$

$$q_c = 1131.45 - (741.46)$$

$$q_c = 389.99 \text{ [W]}$$

La eficiencia térmica se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_c = \frac{q_c}{I_c \cdot A_a} \quad \text{[Ecuación 34]}$$

$$\eta_c = \frac{389.99}{(1082.52)(2.01)}$$

$$\eta_c = 0.18$$

$$\eta_c = 18\%$$

2.8 Balance de energía en la superficie del recipiente

En el cálculo de la ganancia de calor se puede determinar el valor que llega al receptor, donde se encuentra ubicado el recipiente, pero es de interés del proyecto conocer datos adicionales sobre la transferencia de calor en el recipiente, por lo que mediante el análisis de balance de energía se tiene lo siguiente:

$$E_{en} - E_{sal} = \Delta E_{sistema} \quad \text{[Ecuación 35]}$$

Donde:

E_{en} = Energía de entrada al sistema

E_{sal} = Energía de salida del sistema

$\Delta E_{sistema}$ = Energía total del sistema

Las consideraciones para el balance de energía son que: Primero se trata de un sistema estacionario con masa fija, que es el fluido de trabajo, es decir no están condicionados, ni por la velocidad o elevación, o movimiento alguno del fluido a través del tiempo durante el proceso (Cengel, 2007). Adicional a esto, el fluido de trabajo para realizar las pruebas es agua líquida a $[T_{\infty}]$, este fluido fue seleccionado ya que la mayoría de alimentos son preparados utilizando fluido. Por otro lado, el recipiente fue seleccionado de una fundición de aluminio, un material bastante usado en las ollas para cocina. Debido a sus propiedades térmicas, por su peso al ser un material liviano, por su fácil adquisición y bajo coste y además que a mediano plazo es un material que no sufre un desgaste considerable. Por lo que se deduce que:

$$E_{en} = \Delta U_{sistema} = \Delta U_{H_2O(líq)} + \Delta U_{Al} \quad \text{[Ecuación 36]}$$

Donde:

$\Delta U_{sistema}$ = Energía interna total del sistema

$\Delta U_{H_2O(líq)}$ = Energía interna del fluido

$$\Delta U_{Al} = \text{Energía total del material del recipiente}$$

La ecuación 36 establece que al ser considerado un sistema estacionario, solo existe cambios de sus energías internas $\Delta U_{H_2O(lq)}$ y ΔU_{Al} . Por lo que se procede a calcular sus valores, al reemplazar los parámetros de las Tablas 16 y 17:

Tabla 16.
Características del fluido

Tipo	Parámetro	Valor	Unidad
Fluido: Agua líquida	m	5.989≈6	[kg]
	V	6	[l]
	ρ	998.26	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$
	C_p	4.1968	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$

Nota: Los valores de la Tabla 16 fueron obtenidos de (Cengel, 2007)

Elaborado por: B. Paredes (2016)

La Tabla 16 muestra los valores para una aleación de aluminio utilizada ampliamente en la industria para fabricar ollas para cocina, a esta elección se debe considerar que el punto de fusión para el aluminio es de 502°C, valor proporcionado por (Cengel, 2007). Adicional a esto con los valores del diámetro exterior ϕ_{ext} y el espesor en la tabla 16 se aplica la ecuación 19 para hallar el volumen del recipiente con un diámetro normalizado según (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2005) que equivale a un volumen de $V \approx 6 [l]$.

Tabla 17.
Características del recipiente

Tipo	Parámetro	Valor	Unidad
Metal sólido: Aluminio	m	1	[kg]
	V	6	[l]
	e	0.63	[mm]
	ϕ_{ext}	240	[mm]
	h	130	[mm]
	C_p	0.883	$\left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$

Nota: Los valores obtenidos en la Tabla 17 fueron obtenidos de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2005) y (Cengel, 2007)

Elaborado por: B. Paredes (2016)

El siguiente procedimiento es usar los valores de las Tablas 16 y 17 y se reemplazan en la ecuación 37 para obtener la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura del agua y del recipiente desde 14.5°C hasta un valor de 91°C, que es la temperatura de ebullición a la presión atmosférica de Quito.

$$E_{en} = (mc_p \Delta T)_{H_2O} + (mc_p \Delta T)_{Al} \quad \text{[Ecuación 37]}$$

$$E_{en} = (6)(4.1968)(91 - 14.5) + (1)(0.883)(91 - 14.5)$$

$$E_{en} = 1993.88 \text{ [kJ]}$$

Donde:

m = Masa del fluido y del recipiente; kg

C_p = Calor específico del fluido y del recipiente; $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

ΔT = Diferencia de temperaturas; K

Si se requiere obtener el tiempo que se demora para que el concentrador suministre 1993.88 [KJ], se tiene que:

$$\Delta t = \frac{\text{Energía total transferida}}{\text{Velocidad de transferencia de la energía}} \quad [\text{Ecuación 38}]$$

$$\Delta t = \frac{1993.88[\text{kJ}]}{0.3899 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right]}$$

$$\Delta t = 5113.82[\text{s}] \approx 85.23 [\text{min}]$$

2.9 Análisis del seguidor solar mecánico

Durante las horas de luz útiles para que el colector pueda recibir la radiación incidente, el sol cambia de posición. Debido a este fenómeno es necesario que el colector mantenga una posición en la cual la radiación incidente sea perpendicular a la apertura del concentrador parabólico, esto para que los rayos no formen un ángulo de desviación con respecto al receptor ubicado en el foco. El tipo de seguidor empleado para este proyecto es un seguidor de eje simple Este-Oeste con seguimiento de Norte-Sur el cual debe tener un movimiento aproximado de $15^\circ/\text{h}$. (Goswami, 2015). En este caso la ecuación para calcular el ángulo de incidencia es dada por (Duffie & Beckman, 2013)

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \delta \cdot \sin^2 h} \quad [\text{Ecuación 39}]$$

La importancia de analizar el sistema de seguidor es que permite que el punto focal dado por la geometría del paraboloide no permanezca desplazado durante las horas de luz solar, ya que de lo contrario las pérdidas por calor costarían mucho a la eficiencia de todo el sistema.

Representación de ubicación geográfica de un seguidor en eje único

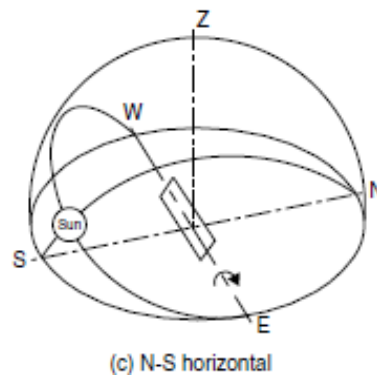


Figura 16. Seguidor de eje único Este-Oeste con giro sentido Norte-Sur
Fuente: (Goswami, 2015)

Capítulo 3

3.1 Proyección a un sistema de inducción

La tecnología de la inducción es un factor importante por considerar debido a que alcanza valores de eficiencia muy altas y es más evidente ver esta gran diferencia al comparar las cocinas de inducción con cocinas a gas. La cocción de alimentos se ejecuta en un menor tiempo. Es importante pensar en una alternativa adicional a la ya planteada por este proyecto, por dos razones. La primera es que a pesar de que la energía solar térmica es muy útil, solo es aplicable durante las horas de luz solar. Existen ya, modelos de equipos solares que funcionan en la noche como la tecnología de nanoantena, mencionado en noticias sobre dispositivos solares novedosos por (Pilloton, 2008), los cuales son pequeños filamentos, 0.04 del diámetro de un cabello humano medidos en el Sistema Internacional, que absorben la energía en el rango de luz infrarroja, por lo que le es posible absorber energía incluso pasado las horas de luz solar en el día.

Otro ejemplo, es el aplicado en los colectores parabólicos en Granada, España en donde la solución es el almacenamiento de energía según lo expone una noticia publicada por (Biello, 2009) en la cual colectores parabólicos concentran la radiación en receptores que contienen sustancias químicas como las sales fundidas que cumplen la función de retener el calor mientras no haya aporte de radiación directa debido a que no se funden hasta alcanzar temperaturas mayores a 800°C, por lo que se puede almacenar el calor ganado en el receptor, donde se puede usar un sistema de intercambiador de calor al calentar las sales y hacer circular un fluido por tuberías. Pero no es una alternativa viable por los altos costos que representa el empleo de estas tecnologías. La segunda es porque al cambiar la matriz energética en el país, las cocinas de inducción vienen a reemplazar con el tiempo a las cocinas a gas. Por tal

motivo es menester poder preparar una opción adicional para la cocción de alimentos con la tecnología de inducción.

El calentamiento de una material por inducción no es un fenómeno actual, existen antecedentes que ya desde 1920 se trataba de implementar esta tecnología, pero es ya en la Segunda Guerra Mundial en donde por la necesidad de energía se intenta implantar el calentamiento por inducción. Debido a la utilización de combustibles fósiles, la investigación en este campo para la aplicación a la vida cotidiana quedó relegada por muchos años hasta que en Europa se planteó la posibilidad de aplicar la inducción para su consumo masivo la tarea estuvo a cargo de la Universidad de Zaragoza.

El principio de funcionamiento es tomado de la teoría electromagnética que explica según los experimentos trazados por Michael Faraday que cuando una corriente alterna i_a es inducida en un espiral i_g ; es decir, un inductor se genera un campo electromagnético i_f , por lo que, si se dispone un inducido Φ_m , como se muestra en la Figura 17 dentro del campo magnético generado, el resultado es que la corriente alterna generada es inducida hacia este último. (Grupo GH, 2011).

Una vez aclarado el principio de funcionamiento para las cocinas de inducción es importante aclarar ciertos puntos. En el inducido se debe utilizar por lo menos en la base, la cual va a estar situada en el campo de acción del flujo electromagnético, materiales ferromagnéticos; lo que quiere decir que, los materiales que normalmente se manejan en la cocina como utensilios de aluminio, cerámica, terracota o vidrio no pueden ser capaces de transformar la energía electromagnética en energía calorífica para la cocción de alimentos. Por lo tanto, en este capítulo se expondrá qué tipo de materiales sí se pueden usar para cocinar alimentos en una cocina de inducción.

Pruebas recientes se han efectuado para comparar la cocción de alimentos entre varios aparatos de cocina de uso común en el hogar.

El estudio llevado a cabo por Martínez-Gómez, Ibarra, Villacis, Cuji, & Cruz (2015) relaciona el consumo de energía generado y el precio que se tendría que pagar para cocinar platos típicos y algunos productos en Quito, Ecuador; algunos ejemplos analizados son el calentamiento de leche, pollo asado, papas cocinadas y otros más; todo esto analizados cada uno en una cocina por resistencia eléctrica, una cocina que utiliza GLP (gas licuado de petróleo) y una cocina de inducción.

Esquema de funcionamiento de inducción

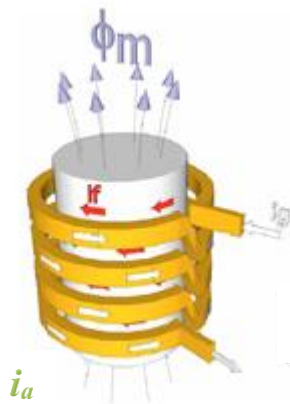


Figura 17. Principio de funcionamiento de un sistema de inducción.
Fuente: (Grupo GH, 2011)

Los resultados muestran que a pesar de que para todos los platos se trabaja con una temperatura inicial y que para cada plato la temperatura final es análoga, respectivamente en cada dispositivo de cocción ya mencionado; el tiempo necesario para alcanzar dichas temperaturas sí varía. Por ejemplo, para llevar 300 ml de leche desde una temperatura inicial de 25°C a una temperatura final de 75°C a una cocina de inducción le tomaría 53 s llegar a esa temperatura con 0.039 kWh a un valor de

USD 0.004, este valor es el más bajo al comparar al calentamiento del mismo volumen de leche en los otros dispositivos de cocción.

De manera similar al confirmar los resultados obtenidos con el calentamiento de otros platos típicos se concluye que el consumo de energía junto con el precio que equivale su cocción, es claramente menor al compararlos con el GLP y el de resistencia eléctrica, que en el primer caso tendría que asumirse el precio del tanque de gas licuado cuando sea necesario su reemplazo. La Tabla 18 muestra los valores obtenidos en esta investigación para varios platos típicos.

Tabla 18.

Procesos de cocina y los ingredientes de platos cocinados cocinas GLP, eléctricas e inducción

Dish	LPG stove					Electric resistance stove					Induction stove				
	T_0 (°C)	T_f (°C)	Time (s)	Energy (kW h)	^a Price (\$)	T_0 (°C)	T_f (°C)	Time (s)	Energy (kW h)	Price (\$)	T_0 (°C)	T_f (°C)	Time (s)	Energy (kW h)	Price (\$)
Hard-boiled egg	15	94	1125	0.456	0.040	15	94	3000	0.298	0.027	15	94	542	0.169	0.015
Grilled chicken	15	72	510	0.427	0.038	15	72	1575	0.281	0.026	15	72	425	0.233	0.021
Milk	15	90	82	0.081	0.007	15	75.5	960	0.112	0.010	15	90	53	0.039	0.004
Boiled chochos	15	94	502	0.125	0.012	15	94	1419	0.091	0.009	15	94	210	0.060	0.006
Steamed fish	15	75	620	0.439	0.039	15	92	1525	0.250	0.023	15	92	365	0.214	0.020
Boiled broccoli	15	93	655	1.410	0.120	15	93	2400	0.140	0.010	15	94	165	0.065	0.006
Little orange with oatmeal drink	15	95	2435	0.690	0.61	93	95	3625	0.430	0.040	93	95	1205	0.370	0.034
Russian salad	15	94	8491	1.191	0.105	15	94	12.301	0.954	0.078	15	94	2406	0.740	0.068
Boiled carrots	15	92	2115	0.550	0.048	15	92	3058	0.407	0.037	15	92	595	0.335	0.031
Boiled potatoes	92	93	2416	0.211	0.019	92	93	3501	0.183	0.017	92	93	685	0.107	0.010
Boiled peas	93	94	3960	0.430	0.038	93	94	5692	0.364	0.034	93	94	1126	0.298	0.027

Nota: Se compara las pruebas hechas con ciertos ingredientes de esta tabla como la leche.

Fuente: Martínez-Gómez, Ibarra, Villacis, Cuji, & Cruz (2015)

Se puede observar la relación entre la energía que toma para calentar el alimento en kilovatios-hora kWh y el tiempo en segundos, se puede notar claramente que una cocina a inducción es considerablemente más eficiente que una cocina eléctrica y existe una brecha aún mayor para una cocina que usa la combustión para la cocción al usar GLP. De esta manera, para el mismo ejemplo del volumen de leche en el ejemplo anterior, una cocina con GLP requiere de 0.081 kWh , mientras que una cocina a inducción requiere de 0.039 kWh , para lo cual se verifica que la cocina de inducción tiene un valor aproximadamente de 51% más eficiencia que una de

tecnología GLP y es 65% más eficiente que una que utiliza solamente la fuente eléctrica. En la Figura 18 se puede observar la variación entre la relación potencia-tiempo para estas cocinas. En donde es considerable la cantidad de potencia que requiere una cocina de GLP y de fuente eléctrica y la cantidad que necesita una cocina de inducción, la cual utiliza valores muy por debajo de las otras tecnologías.

Al considerar la contaminación al medio ambiente y la contaminación que puede sufrir el ser humano, también se puede identificar qué cantidad de CO_2 emana la cocción de ciertos alimentos en la acción de cada tecnología de cada tipo de cocina, por lo que para el mismo ejemplo se tiene que la emanación de este gas es mínima y casi análoga para las tecnologías de inducción y eléctrica, no obstante las mediciones tratadas en una cocina que utiliza GLP los valores están dentro del rango permisible 1000 ppm (partes por millón) (Indoor Air Quality Standard of China (GB/T 18883–2002), 2002), tiene una mayor cantidad de desprendimiento al cocinar, esto es debido a la combustión que se genera en el proceso.

Consumo de potencia en el tiempo de una cocina GLP, eléctrica e inducción

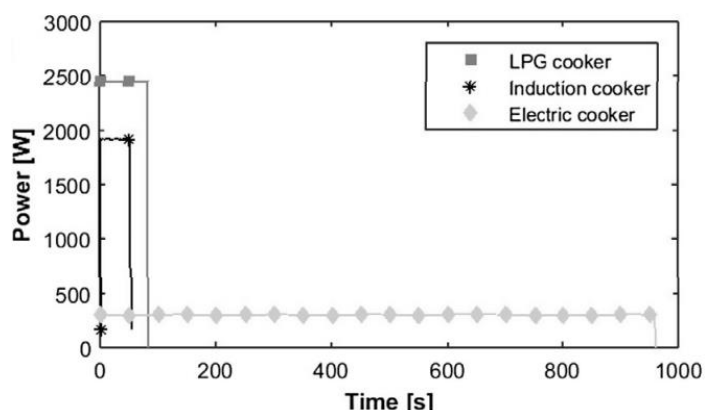


Figura 18. Gráfica Potencia vs. Tiempo para calentar 300 ml de leche

Fuente: Martínez-Gómez, Ibarra, Villacis, Cuji, & Cruz (2015)

En la Figura 19 se puede observar para el ejemplo del calentamiento del volumen de leche donde se muestra la variación en la gráfica la cantidad de CO_2 para cada tipo de cocina.

Variación de CO_2 de una cocina GLP, eléctrica e inducción

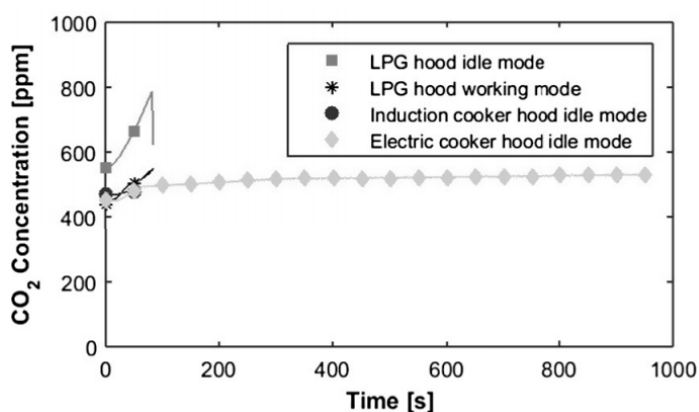


Figura 19. Gráfica desprendimiento de CO_2 para calentar 300 ml de leche.

Fuente: Martínez-Gómez, Ibarra, Villacís, Cuji, & Cruz (2015)

Por ejemplo, en el caso de la cocina eléctrica con el toldo en modo inactivo los valores de emisión incrementan ligeramente pero no sobrepasan el límite permitido por la norma, por lo que después llega a estabilizarse en el tiempo.

Al esclarecer la razón y las características que muestran que una cocina a inducción es la mejor alternativa para utilizarse como una tecnología renovable junto a una cocina solar, a continuación se presentan ciertas condiciones que deben cumplir los materiales incluidos en la cocina de inducción para que funcione de manera adecuada.

Se mencionó ya previamente que las ollas tienen que poseer un tipo de material para poder funcionar en una cocina de inducción, por lo que se necesita de metales ferromagnéticos para su funcionamiento, tres tipos de ollas comúnmente en el mercado, algunos son mencionados en el estudio practicado por (Villacís *et al*, 2015)

como son: Acero inoxidable AISI 430, fundición de hierro esmaltado, aluminio con base de acero inoxidable AISI 430. En el estudio se verificó la reacción del material bajo ciertas condiciones térmicas de funcionamiento midiendo de esta manera los cambios en la concavidad y convexidad en la base de las ollas, la eficiencia energética antes y después de las pruebas en las ollas para varias alturas medidas desde la base de la cocina de inducción. La conclusión fue que para la tecnología de inducción y para el tipo de ollas experimentadas la de fundición de hierro esmaltado fue la que presentó la mejor eficiencia energética bajo el impacto térmico con un 85.05% de eficiencia energética frente a un 83.57% que se presentó en la olla de aluminio y un 83.98% en la olla de acero inoxidable.

Así mismo, la que presentó mayor incremento en la concavidad fue la olla de hierro esmaltado, mientras que en las ollas tanto de acero inoxidable como la de aluminio se presenta un incremento mayor hacia la forma convexa lo que según lo mencionado por (Villacís *et al*, 2015) podría ocasionar un problema al cocinar, debido a que la superficie de contacto de la olla frente al plano de la cocina de inducción sería menor y la conducción del calor; y por tanto, el calentamiento sería desigual en ciertas partes de la olla, lo que no resulta en una estabilidad de cocción.

Para el diseño de un sistema de inducción para cocina se necesita de tres partes fundamentales primero la bobina que consta de varias espiras de diámetro grueso, el cual previamente se le llamó inductor en el principio de funcionamiento, el cual recibe la energía de la fuente de poder, el tipo de material empleado puede ser un alambre de cobre esmaltado, lo segundo es la placa de vitrocerámica la cual debe poseer un coeficiente de dilatación de -100°C a 700 °C (Panchi, 2013) y por último la olla de material ferromagnético.

Al igual que en la cocina solar, en la cocina de inducción se necesita de parámetros iniciales para calcular el material y los elementos que se necesitan para un diseño adecuado. Entonces se tienen las siguientes especificaciones y necesidades: Potencia de consumo = 500 W, tamaño de la olla: diámetro de $\varnothing = 245\text{mm}$ y altura de 130 mm, material: acero inoxidable ferrítico. En la proyección de inducción se decidió por el diseño planteado en la investigación de (Thandar, Saldanah, & Moe, 2008) para una cocina por calentamiento de inducción en donde se diseña un sistema que funcione con corriente alterna; que funcione con una fuente de poder de tipo convertidor resonante de medio puente para 100 V-50 Hz con $\pm 15\%$ de fluctuación de voltaje. Entonces, lo primero es asumir que la corriente alterna de entrada es la corriente resonante promedio en el circuito principal de poder. Por lo que se tiene que la corriente es:

$$I = \frac{2 \cdot \pi \cdot P_{\text{pro}}}{V_{\text{pico}}} \quad [\text{Ecuación 40}]$$

$$I = \frac{2 \cdot \pi \cdot 500}{85 \cdot \sqrt{2}}$$

$$I = 26.13 \text{ A}$$

Al emplear esta ecuación se concluye que la corriente para el diseño es de 26.13 Amperios. Donde se ha considerado un voltaje pico de $85 \cdot \sqrt{2} = 120 \text{ V}$ con una frecuencia de conmutación alrededor de los 24 kHz. El valor de la inductancia para la bobina de carga es obtenida desde la capacitancia en resonancia. Desde los valores de corriente máxima, la capacitancia se obtiene por la siguiente ecuación

$$C = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V} \quad [\text{Ecuación 41}]$$

$$C = \frac{26.13}{2 \cdot \pi \cdot 24 \cdot 10^3 \cdot 85 \cdot \sqrt{2}}$$

$$C = 1.44 \mu F$$

Al buscar un capacitor que tenga el valor calculado en la ecuación anterior se elige uno de $1.5 \mu F$ con una relación de 25 kHz y 400 V de voltaje máximo. Lo siguiente es obtener la inductancia de la bobina de carga, para lo cual se calcula desde la siguiente expresión:

$$L = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 C} \quad \text{[Ecuación 42]}$$

$$L = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 24 \cdot 10^3)^2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-6}}$$

$$L = 29.32 \mu H$$

De igual manera, se verifica una inductancia que se acerque al valor obtenido y exista de forma comercial con el valor obtenido de la ecuación por lo que se escoge una inductancia de $30 \mu H$. Para obtener el número de vueltas de la bobina se usa la siguiente ecuación:

$$L = \frac{a^2 \cdot N^2}{(9 \cdot a) + (10 \cdot b)} \quad \text{[Ecuación 43]}$$

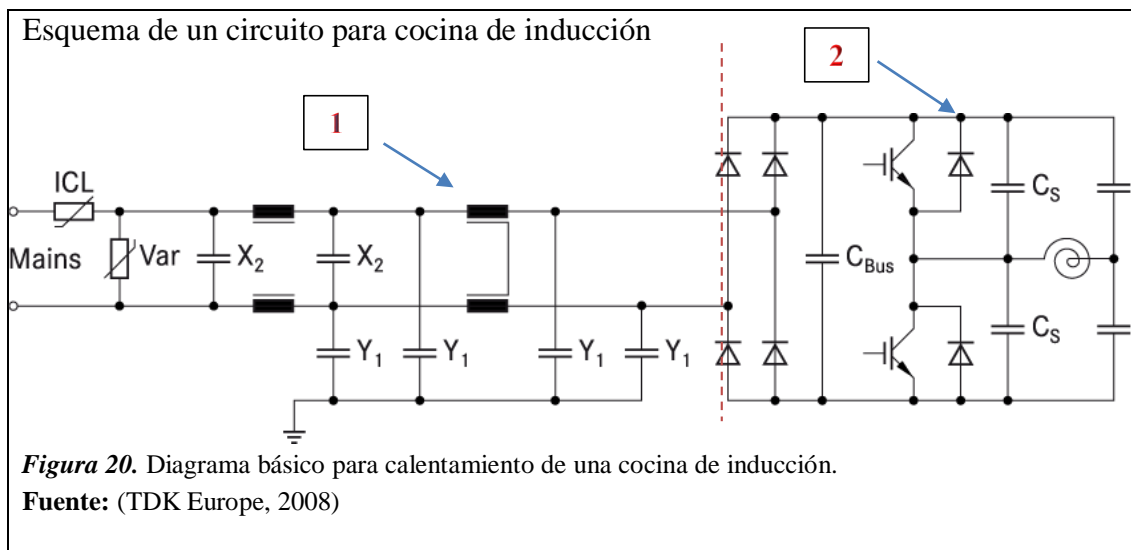
$$30 = \frac{9.44^2 \cdot N^2}{(9 \cdot 9.44) + (10 \cdot 5.11)}$$

$$N^2 = 45.80$$

$$N = 6.76 \text{ vueltas}$$

Debido a que se debe desarrollar una bobina que cubra un recipiente de 240 mm de diámetro y 130 mm de altura que cumpla con las condiciones de bobina de carga de 26.1 A con una frecuencia de conmutación alrededor de los 24 kHz, se utiliza una bobina de carga de alambre de cobre tipo 8 SWG (Standard Wire Gauge).

En la Figura 20 se presenta un diagrama de bloque básico del circuito de poder usualmente usado para una cocina de inducción tomado de (TDK Europe, 2008) en donde en primera instancia se puede observar el circuito de entrada el cual actúa como filtro que se encarga de que ninguna reacción ocurra en la línea de poder debido a las altas frecuencias generadas en el circuito de poder donde las variables mostradas como el ICL (Inrush Current Limiter), que reduce la corriente de magnetización, VAR (Varistor) para la protección contra las variaciones de tensión, X_2 , Y_2 que son capacitores. La segunda parte está constituida por el circuito de poder el cual necesita de supresores para reducir el estrés eléctrico cuando se producen los picos de voltaje, un circuito intermedio, en donde existen capacitores destinados a regular el voltaje rectificado de la corriente alterna y para minimizar la fluctuación de voltaje y los capacitores de resonancia.



3.2 Análisis económico

Determinar el costo total de fabricación de la cocina solar es el siguiente paso. Para esto se procede a considerar un proceso detallado de la fabricación de un prototipo único. Por lo tanto, se considera un proceso alternativo adaptado de la teoría proporcionada por (Baca Urbina, 2013) en la cual se establece una serie de

lineamientos que se pueden tomar en cuenta para establecer el costo de producción en un proyecto, en este caso, de una cocina solar parabólica. De esta manera se considera lo siguiente:

3.2.1 Costo de materia prima

La mayoría de elementos que componen la estructura del prototipo están hechos de planchas de acero de diferente designación, lo cual se dispone en la Tabla 19. Para algunas platinas como los soportes para la mesa y el paraboloide o las platinas de la contención para el ensamble de los pedazos del molde para dar forma al concentrador por lo que se pudo conseguir pequeños cortes en bodega, de forma que no se tuvo que comprar el material completo para esos casos.

Tabla 19.
Costos de materia prima

Ítem	Descripción	Cant.	Dimensiones	Material	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
1	Platina anillo base	1	628.32x35x3mm	Acero inoxidable AISI 304 Mate	2	2
2	Platina anillo paraboloide	1	5026.5x35x3mm	Acero inoxidable AISI 304 Mate	5	5
3	Platina curva de contención	16	1684.80x35x3mm	Acero inoxidable AISI 304 Mate	1.90	30.40
4	Tubo redondo para olla	2	6000x1/2''x2 mm	Galvanizado	2.5	5
5	Lámina de acero	2	1220x2440x0.6mm	Acero inoxidable Brillante AISI 430	44	88
6	Tubo cuadrado para estructura	3	50x50x2x6000 mm	ASTM A36	15	45
7	Tubo redondo soporte olla	1	3000mmx1/2''	Galvanizado	2	2
8	Placa base mesa	2	100x70x50x5 mm	ASTM A36	1.50	3
9	Placa base paraboloide	2	100x140x10x6 mm	Acero inoxidable AISI 304 Mate	3	6
10	Perno	2	1/2''x2''	Galvanizado A325	0.40	0.80

11	Arandela	4	1/2"	Galvanizado A325	0.20	0.80
12	Tuerca	4	1/2"	Galvanizado A325	0.30	1.20
Total					189.20	

Nota: Desde un inicio se planteó el conseguir materiales reciclados y usados, como el tubo cuadrado.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

3.2.2 Costo de mano de obra

El costo de mano de obra está basado en el tiempo que emplea cada técnico en efectuar un cambio en el material para beneficio de la construcción del concentrador. Para esto, la experiencia del técnico soldador y mecánico fueron importantes debido a su conocimiento técnico. Esto se evidencia por ejemplo en la dificultad del tratamiento del acero inoxidable, este material necesita ser soldado con alambre AWS-ER308H en la soldadora MIG y con el aporte 308L en la soldadora TIG, se presentan dificultades al querer perforar este material debido a su dureza y no se deforma fácilmente en una dobladora normal.

Tabla 20.
Costos de mano de obra

Cargo	Salario/hora (USD)	Tiempo empleado en horas	Costo (USD)
Técnico soldador	1.90	15	28.50
Técnico mecánico	1.90	10	19
Ayudante	1.66	7	11.62
Total			59.12

Nota: Es de gran importancia que una persona asista al técnico en la soldadura de las partes.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

3.2.3 Costo de proceso de manufactura

El proceso para obtener la forma del paraboloide se centró más en el corte de material con una cizalla industrial, al obtener todas las cotas transformadas a una cantidad lineal se pudo obtener la forma deseada en cada uno de los elementos. Por

ejemplo, para la estructura del paraboloide se tiene un anillo de diámetro 1600 mm, sin embargo para obtener esta forma el procedimiento fue el siguiente. Primero, al conocer el diámetro se obtiene el perímetro del anillo, cuyo valor proporciona la longitud lineal a cortar, lo siguiente es elegir el material en el que se va a trabajar, el cual fue el AISI 304; a continuación y con la intención de soldar piezas en su pared se consideró un ancho de platina de 35 mm.

Entonces la medida para cortar el material en la cizalla industrial desde una lámina de 1220 x 2400 mm para el anillo que es el diámetro de apertura fue de 35 x 5026.55 mm. Una vez obtenido este corte lo siguiente es dar la forma de un círculo perfecto en la roladora, lo cual se obtiene con varias pasadas entre sus ejes con la presión adecuada. Finalmente se verifica la forma con un flexómetro y se procede a soldar sus dos extremos con la soldadora MIG. Este procedimiento se aplicó y se mantuvo en la mayoría de los casos para los otros elementos.

Tabla 21.
Costos de manufactura

Máquina herramienta	Costo/hora (USD)	Horas empleadas	Costo total (USD)
Cizalla	0.50/ corte	30	15
Roladora	0.50/ curva	16	8
Soldadura MIG	6	6	36
Soldadura TIG	8	3	24
Total			83

Nota: El proceso de la roladora debe ser verificado con una matriz con la forma curva de la parábola.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

3.2.4 Costos varios

Este apartado presenta los costos adicionales para la construcción del concentrador, en donde se detalla la compra de artículos específicos para la fabricación y el respectivo instrumento para su posterior análisis.

Tabla 22.
Costos varios

Ítem	Descripción	Cant.	Dimensiones	Material	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
1	Disco de desbaste	1	230x4.8x22mm	N.A	2.85	3.26
2	Sikaflex 221	2	300 ml	Poliuretano	8.51	17.02
3	Cinta doble faz	1	180x300mm	N.A.	8.47	8.47
4	Marcador permanente negro	2	N.A.	N.A.	2.76	2.76
5	Pirómetro	1	N.A.	N.A.	25	25
					Total	56.21

Nota: Se puede añadir otro tipo de instrumentos de medición de temperatura como una termocupla.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

3.2.5 Costo final de la cocina parabólica

El costo final de la cocina parabólica es el resultado de la suma de todos y cada uno de los costos antes mencionados, para lo cual se tiene que la materia prima fue el elemento con el costo más elevado con un costo de USD 189.20. Luego le sigue el costo por proceso de manufactura que fue de USD 83.00; estos dos valores son importantes de analizar debido a que en el primero es muy poco probable conseguir una disminución debido a los precios de los materiales en el mercado que tienden a un incremento más bien que al contrario. En el segundo caso, es más factible un decremento en el costo debido a que al ser el primer prototipo el proceso de manufactura fue lento e incluye errores al inicio que debieron ser corregidos, lo cual significó un mayor tiempo de trabajo y gasto de material.

Por lo cual se puede mejorar en gran manera tanto el costo de manufactura como en mano de obra y de hecho, mejorar el proceso con un know-how obtenido en la construcción de este primer prototipo. Finalmente, al emplear la suma se obtiene que

el costo total de la cocina parabólica está en USD 387.53 lo cual es un valor relativamente alto para la competitividad de otros aparatos que puedan ofrecer cocción de alimentos. En el informe realizado por (Löf, 1963) se detalla que el costo de fábrica de un concentrador paraboloide llamado S/87 con un diámetro de apertura de 1220 mm de diámetro patentado por Duffie, Beck y Löf fue de USD 16.00 en 1963 en los Estados Unidos, ahora se ofertan en internet concentradores del mismo diámetro de apertura por valores del rango de USD175 a USD 235 puede verificarse en páginas que lo comercializan como la de Nathan Parry (Parry , Cantina west parabolic solar burner, 2015) o las alemanas tipo Seifert nombradas por su creador (Seifert, 2009)

Tabla 23.
Costo final de la cocina parabólica

Descripción	Valor (USD)
Costo total materia prima	189.20
Costo total mano de obra	59.12
Costo total proceso de manufactura	83.00
Costo total otros	56.21
Costo final	387.53

Nota: Los materiales representan un costo muy elevado para la construcción.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

3.3 Recomendaciones para realizar los experimentos

La construcción de la cocina parabólica permite que se pueda realizar el análisis térmico sobre el envase que va a contener el fluido de trabajo y los alimentos a cocinar. Las variables que van a influir en el experimento son la temperatura que alcanza el fluido en determinadas condiciones, estas condiciones están caracterizadas por la radiación total que recibe el paraboloide, la velocidad del viento, el tipo de

comida puesta a cocción y debido a que se toman los valores de tiempo que van desde las 10:00 am. hasta las 14:00 pm. La inclinación del paraboloide con respecto al plano debe estar bien orientada a determinada hora del día.

El procedimiento que se sigue para tomar las mediciones va a ser el siguiente: Primero se orienta al paraboloide hacia la altitud del sol a determinada hora del día. La manera en que se deriva en esto es al utilizar un señalador soldado en la parte superior y media sobre el anillo superior que es el diámetro de apertura del paraboloide. Debido a que la radiación incidente siempre debe tener un ángulo de 90° sobre la superficie del paraboloide para que este pueda reflejar la radiación en el punto focal; este señalador forma una sombra sobre la orilla del anillo de apertura, si es que el ángulo de inclinación del plato paraboloide no está acorde a la altitud del sol en determinada hora.

Por lo que cuando al mover el paraboloide hasta orientarlo al ángulo adecuado, el señalador dejará de formar imagen alguna de sombra sobre la orilla del anillo; de esta manera, reflejará en el mismo ángulo que el paraboloide, lo que quiere decir que la radiación incidente chocará contra la superficie del plato en el ángulo de 90° . Este seguimiento solar deberá emplearse cada 15 minutos para evitar que el punto focal se convierta en un desplazamiento impreciso de lugares sobre la base de la olla y que su centro quede sin concentración puntual que hará que la cocción sea inestable.

A continuación con un termómetro infrarrojo proceder a tomar la temperatura tanto en el fluido de trabajo contenido dentro del envase u olla, como en la superficie inferior de la olla, es decir donde se encuentra el punto focal. Se procede a realizar una tabla de valores que contiene el tiempo preciso en que se tomó la medición. Por lo que se deberá tomar el tiempo que demora el agua junto con los ingredientes en

alcanzar la temperatura de ebullición. De lo contrario, la temperatura que se necesitaría para freír los alimentos.

Debido a que se trata de un dispositivo que refleja directamente la radiación solar se debe tener cuidado al acercarse al colector debido a que la luz puede provocar ceguera momentánea por la cantidad de luz que tiene que soportar el ojo humano, para solucionar esto se puede utilizar gafas oscuras, que no permiten que llegue el reflejo directamente al ojo sino que pasa por el filtro oscuro.

Adicional a esto foco del colector, es decir el lugar geométrico en las proximidades de la base del recipiente, alcanza temperaturas de 200°C, por lo que se debe tener cuidado de no mantener la mano, mucho tiempo en ese sector específicamente.

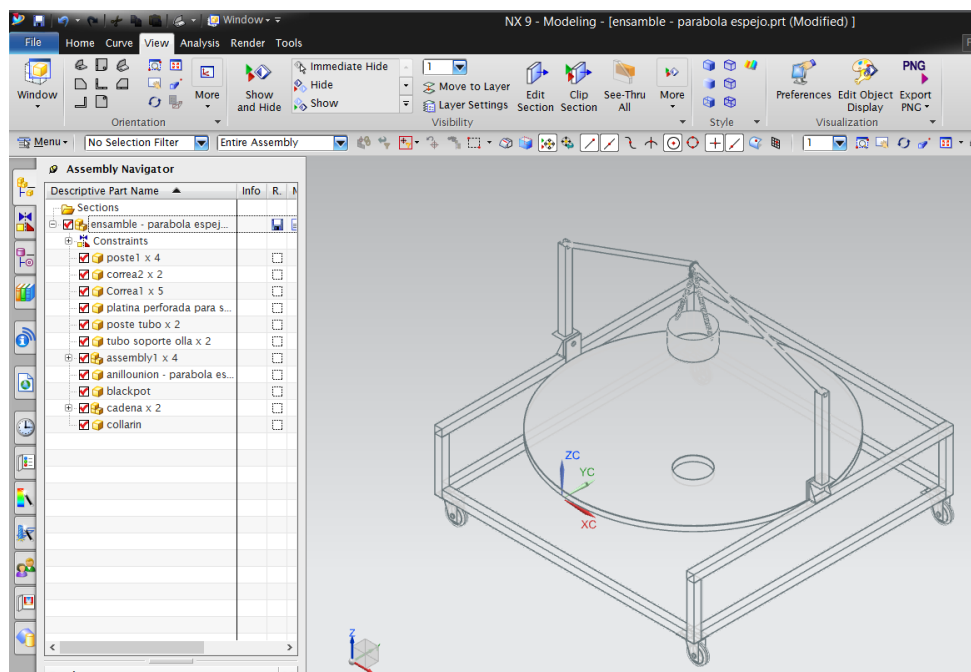


Figura 21. Equipo en donde se va a realizar los experimentos

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Datos obtenidos por las pruebas

3.3.1 Experimento 1

Fecha: 01 de Junio del 2016

Rango de horas: 10:30 am hasta 13:00 pm

Volumen: 4 litros de agua en un recipiente con capacidad máxima de 6 litros

Temperatura ambiente: 17°C

Tabla 24.

Datos tomados en el Experimento 1

Hora del día	Tf del Agua(°C)	Ti del Agua(°C)	Δ Tiempo
10:00	17	-	-
10:15	24.5	17	0:15
10:30	31.4	24.5	0:15
10:45	39.7	31.4	0:15
11:00	47	39.7	0:15
11:15	52	47	0:15
11:30	57	52	0:15
11:45	48	57	0:15
12:00	45	48	0:15
12:15	61.3	45	0:15
12:30	51.4	61.3	0:15
12:45	49	51.4	0:15
13:00	41.5	49	0:15

Nota: Los datos son tomados cada 15 minutos con un pirómetro de infrarrojos.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

En este día se propuso solamente experimentar con el volumen de agua en donde se comenzó con el valor del agua a temperatura ambiente, las condiciones climáticas en esta fecha hicieron que la cocina solar trabaje en el peor entorno atmosférico posible, es decir con radiación difusa con intermitencia en la aparición del sol en el firmamento. De hecho, se puede verificar en la Figura 21 una caída en la temperatura de 12°C cuando con radiación directa normal debió haber ocurrido todo lo contrario. En este día la temperatura más alta registrada fue de 61.3°C a las 12:15 am. Las

pruebas se hicieron hasta las 13:00 pm debido a que se presentó llovizna y la cocina no pudo mantener constante la temperatura sin sol.

Experimento 1

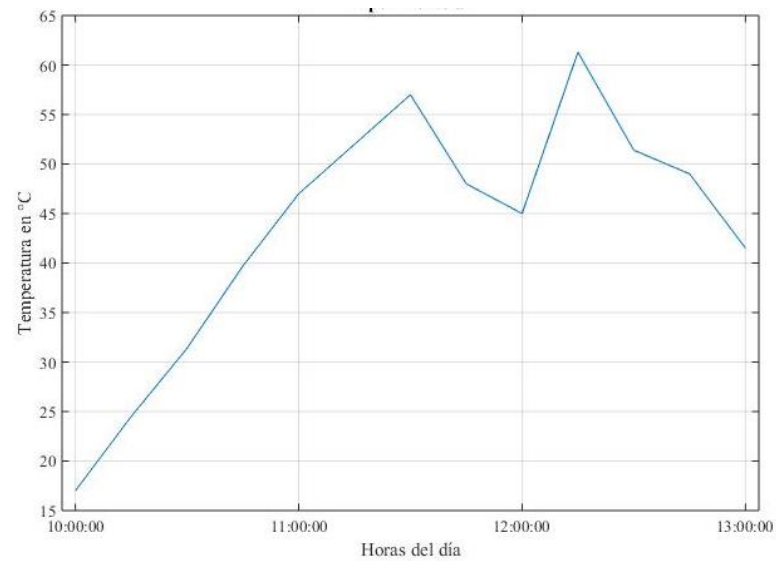


Figura 22. Gráfica temperatura vs horas del día para ebullición de agua
Elaborado por: B. Paredes (2016)

3.3.2 Experimento 2

Fecha: 17 de Junio del 2016

Rango de horas: 10:00 am hasta 14:00 pm

Volumen: 4 litros de agua en un recipiente con capacidad máxima de 6 litros

Tabla 25.

Datos tomados en el Experimento 2

Hora del día	Tf del Agua(°C)	Ti del Agua(°C)	Δ Tiempo
10:00	18	-	-
10:15	45.9	18	0:15
10:30	48.5	45.9	0:15
10:45	55	48.5	0:15
11:00	63	55	0:15
11:15	65	63	0:15
11:30	70	65	0:15
11:45	74	70	0:15
12:00	81.8	74	0:15
12:15	78	81.8	0:15
12:30	82	78	0:15
12:45	68.7	82	0:15
13:00	71	68.7	0:15
13:15	80	71	0:15
13:30	71	80	0:15
13:45	77	71	0:15
14:00	74	77	0:15

Nota: Los datos son tomados cada 15 minutos con un pirómetro de infrarrojos.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

El experimento 2 es similar a su antecesor en su descripción inicial, las condiciones climáticas fueron favorables con cielo despejado desde la mañana. La meta por cumplir en este era la de conseguir la ebullición de 4 *kg* de agua en 90 minutos. En la Figura 22 se presenta una tendencia ascendente de calentamiento en donde se inicia con una temperatura del fluido de 18°C, después de 15 minutos, es decir a las 10:15 am la temperatura del fluido ha cambiado para alcanzar los 45.9°C. A las 11:45 am se percibe los primeros indicios de evaporización del fluido, puesto

que se utilizó sobre la olla una tapa cubriendo está parcialmente la olla necesitando una menor temperatura al aumentar la presión en el interior de la olla. El valor más alto registrado en este día fue de 82°C

Experimento 2

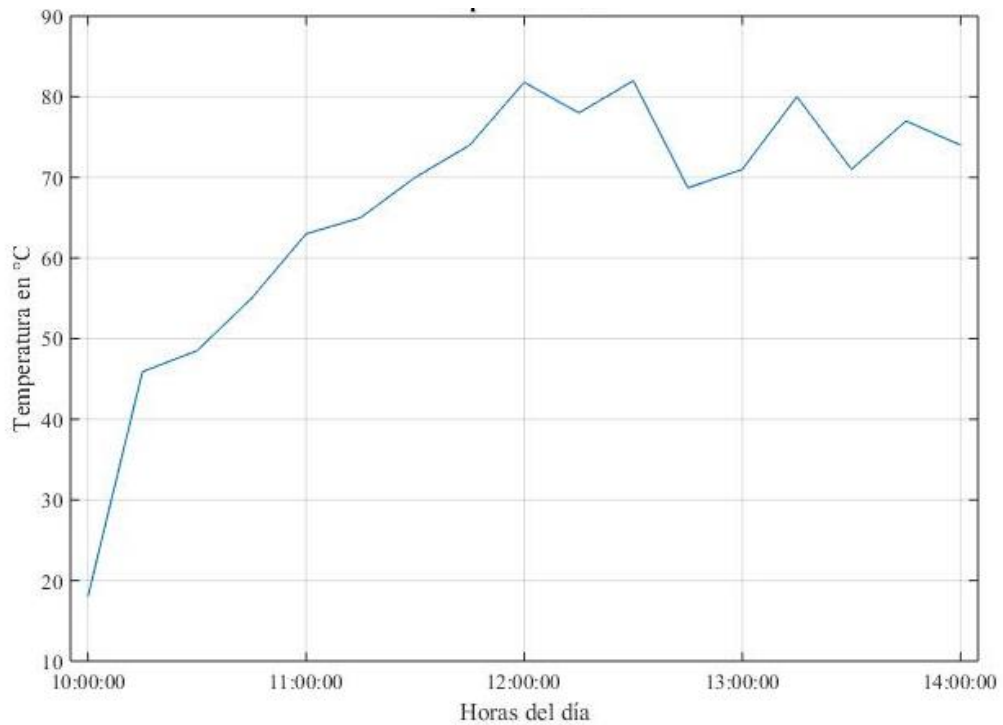


Figura 23. Gráfica temperatura vs horas del día para ebullición de agua

Elaborado por: (B. Paredes, 2016)

3.3.3 Experimento 3

Fecha: 20 de Junio del 2016

Rango de horas: 9:40 am hasta 10:00 am

Cantidad: 113.4 gramos de canguil

Tabla 26.

Datos del Experimento 3

Hora del día	Tf Canguil(°C)	Ti del Canguil(°C)	Δ Tiempo
9:40	18	-	-
9:45	153	18	0:05
9:50	170	153	0:05
10:00	130	170	0:10

Nota: Los datos son tomados cada 5 minutos con un pirómetro de infrarrojos.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Experimento 3

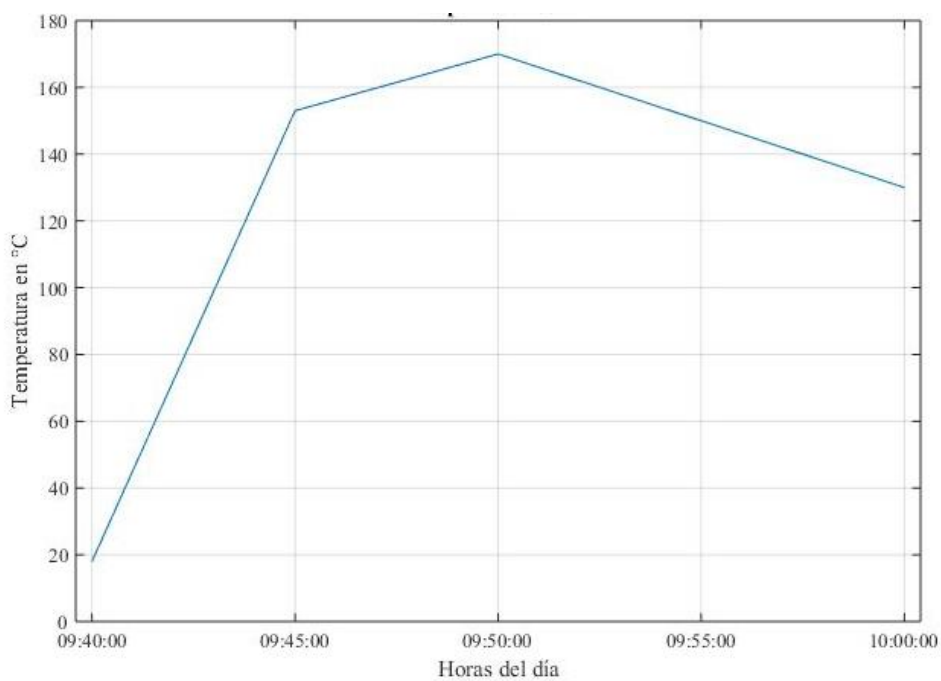


Figura 24. Gráfica temperatura vs horas del día para hacer canguil

Elaborado por: B. Paredes (2016)

El experimento 4 se intenta cambiar el tipo de cocción de la ebullición del agua, para freír ciertos alimentos. En este experimento se trató con el canguil. Para esto se

utilizó aceite de cocina a temperatura ambiente el cual era de 18°C a las 9:40 am. En 15 minutos con el aporte de un cielo abierto y con radiación directa se obtuvo un valor de 153°C. Tiempo en el cual de forma instantánea los granos de canguil empezaron a reventar.

3.3.4 Experimento 4

Fecha: 25 de Junio del 2016

Rango de horas: 10:00 am hasta 10:55 am

Cantidad: 453.6 gramos de papas

Tabla 27.

Datos del Experimento 4

Hora del día	Tf Papas(°C)	Ti del Papas(°C)	Δ Tiempo
10:00	20	-	-
10:15	35	20	0:15
10:30	80	35	0:15
10:45	105	80	0:15
10:55	88	105	0:10

Nota: Los datos son tomados cada 15 minutos con un pirómetro de infrarrojos.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Experimento 4

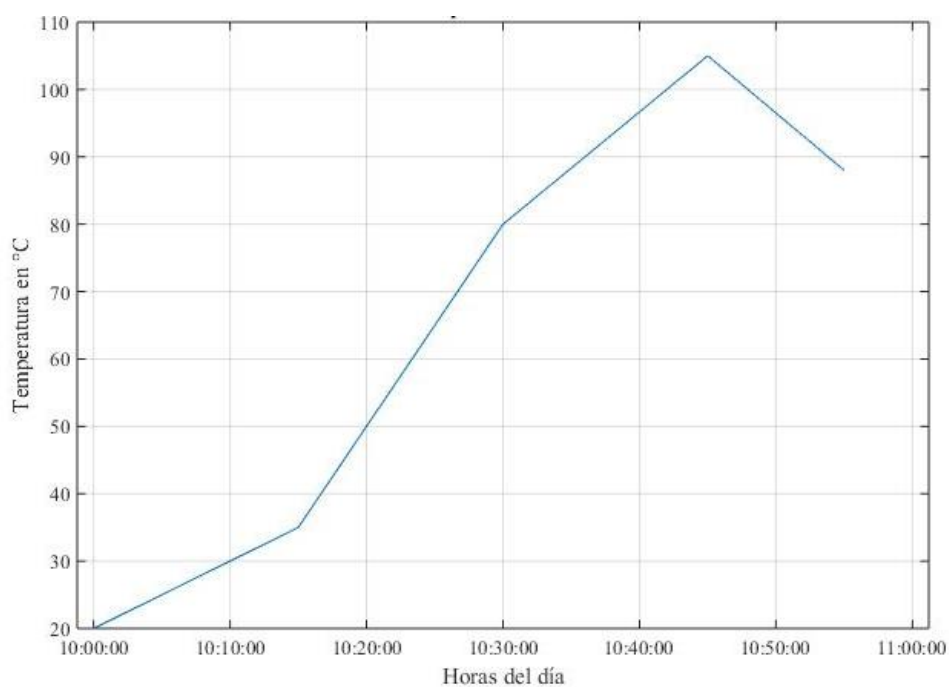


Figura 25. Gráfica temperatura vs horas del día para freír papas

Elaborado por: (B. Paredes, 2016)

Con la práctica obtenida mediante la cocción de canguil, se intentó utilizar otro ingrediente con mayor cantidad de humedad en su interior por lo que se intentó freír 453.6 gramos de papas cortadas en rodajas. Para esto se limpió la olla del proceso anterior y se incluyó aceite de cocina nuevamente, inició con una temperatura de 20°C y en 30 minutos se alcanzó freír la cantidad deseada; aún así se esperó para ver el cambio de los ingredientes al alcanzar mayores temperaturas. Por lo que se alcanzó un pico de temperatura de 105°C a las 10:45 am, sin embargo la cocción se mantuvo estable y las papas experimentaron un ligero quemado al final.

3.3.5 Experimento 5

Fecha: 28 de Junio del 2016

Rango de horas: 10:58 am hasta 11:15 am

Tabla 28.

Datos del Experimento 5

Hora del día	Tf Corvina(°C)	Ti del Corvina(°C)	Δ Tiempo
10:58	16.5	-	-
11:00	115	16.5	0:02
11:15	116	115	0:15

Nota: Los datos son tomados de forma aleatoria en minutos con un pirómetro infrarrojos.

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Experimento 5

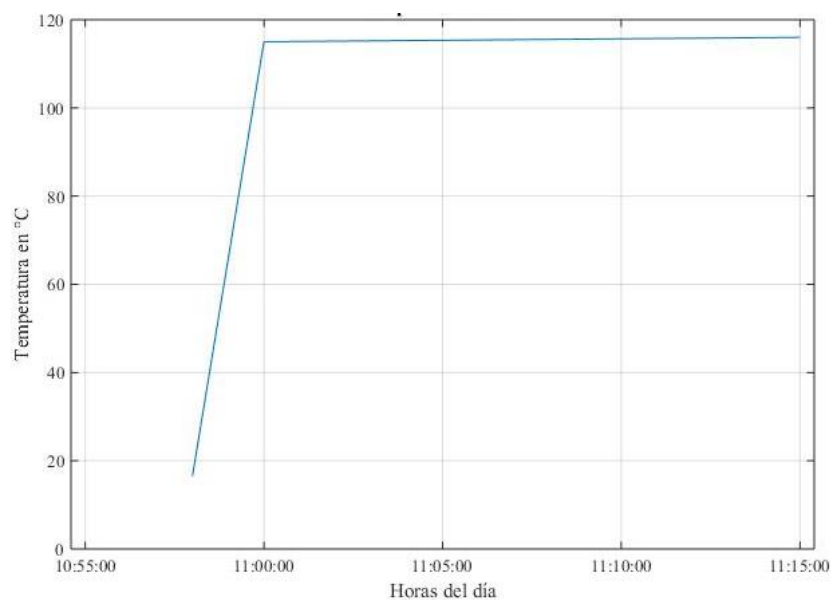


Figura 26. Gráfica temperatura vs horas del día para freír corvina

Elaborado por: B. Paredes (2016)

El último experimento se utilizó dos pedazos de corvina de 30 gramos cada uno, los cuales nuevamente fueron sumergidos en un nuevo aceite de cocina. Debido a que se acercaba al mediodía solar inmediatamente se obtuvieron temperaturas de

115°C y 116°C en un período de 3 a 5 minutos de diferencia desde la temperatura inicial. Por lo que los ingredientes ya estaban listos en un tiempo de 15 minutos.

3.4 Análisis de resultados

Se verificó al hacer los experimentos que la cocina solar con geometría paraboloide se podría mejorar considerablemente con un seguimiento en dos ejes para que la eficiencia no se vea afectada de forma negativa. Se confirmó que cada 15 minutos debía tener un cambio en su orientación para que la radiación pudiese llegar enteramente en un punto fijo en el foco de la cocina. Por lo que se debería utilizar un sistema electrónico de seguimiento solar y automatizar el proceso de seguimiento solar. Se debe verificar constantemente que la reflexión de la radiación está enfocada sobre la base de la olla. La forma de constatar esto es por inspección visual ya que al reflejar los rayos el sol sobre la base de la olla se forma una imagen de luz en un punto, lo cual se debe mantener si se orienta bien al colector durante la trayectoria del sol en día de este a oeste.

En los experimentos realizados en día aleatorios se logró alcanzar una temperatura de hasta 116°C al freír 60 gramos de corvina y una temperatura pico de 82°C empleados para calentar hasta la ebullición de 4 kg de agua. Ahora bien, es evidente que tiene mayor posibilidad de ser utilizada para freír alimentos, que para obtener vapor de un volumen grande de fluido. Esto es precisamente debido a que al freír se utiliza una pequeña cantidad de aceite para la cocción de alimentos y junto con cualquier ingrediente se alcanzan temperaturas altas en poco tiempo, por el contrario al calentar un volumen grande de un fluido como el agua se necesita de más tiempo para lograr su ebullición; pero aún así si solo se requiere su calentamiento se obtienen muy buenos resultados como los mostrados en la Tabla 25.

Al comparar el tiempo que demora en freír la cantidad de papas del experimento 4 que fue de 15 minutos con el que demora en la investigación de (Martínez-Gómez, Ibarra, Villacis, Cuji, & Cruz, 2015) 11.4 minutos se puede verificar que los valores de eficiencia de la cocina de inducción pueden ubicarse en un rango ligeramente mayor que la de la cocina solar, sin embargo el costo es de USD 0 en el caso de la cocina solar. Por lo que es importante denotar la tendencia de este tipo de cocina a freír de forma instantánea la mayoría de ingredientes, más que la de calentar volúmenes grandes de agua para la cocción de alimentos. Otro ejemplo está en que la cocina solar necesita 5.6 min para calentar 300 ml de leche desde una temperatura de 15°C a 90°C mientras que en la investigación de (Martínez-Gómez, Ibarra, Villacis, Cuji, & Cruz, 2015) se necesita de 53 segundos para calentar el mismo volumen en una cocina de inducción.

Las características del recipiente que se utiliza para la cocción en una cocina solar son de gran importancia, ya que por ejemplo al comparar un recipiente de las mismas características cocinando los mismo ingredientes con la única diferencia que el uno es de color negro y el otro de metal pulido se obtiene una gran diferencia de absorción de calor, en donde el primero calienta mucho más rápido la comida como es el caso de los experimentos del 2 al 5 mientras que el metal pulido tarda más tiempo en calentar los alimentos como en el caso del calentamiento de agua del experimento 1. Además, si se utiliza un recipiente de fácil conducción de calor y que pueda mantener el calor en su interior, la cocción de alimentos, la ebullición del agua y el freír de los alimentos se pueden lograr en menor tiempo.

El calentamiento sobre la base de la olla es instantáneo y todo el calentamiento hacia el fluido es por la transferencia de calor por radiación. Esto es importante si denotamos que el sabor de los alimentos no ha sido influido por la combustión en el

caso de las cocinas GLP. Se hizo una prueba en el pH del agua en donde se midió con respecto al agua potable que debe estar en el rango de 6.5 y 9.5, por lo que después que la cocina solar calentó el fluido, éste no había cambiado su pH.

Finalmente, se alcanzó a evaporar un volumen de 4 litros de fluido a las 12:00 am. con una temperatura de 81.8°C como se muestra en la Tabla 25 del experimento 2, en un rango de tiempo de 120 minutos con vientos con velocidades mayores a los 3 m/s en el mes de junio, con condiciones climáticas donde existen cielos parcialmente nublados entrando a la época de verano en una latitud 0.13°S, longitud 78.48°E y a una elevación de 2812 m. Las condiciones climáticas fueron un factor primordial para la cocción de alimentos en el concentrador parabólico, debido a que si bien hubo días soleados en los experimentos en donde se alcanzaron altas temperaturas en la base, la cocción en los alimentos se demoraba en ejecutar. Esto se debió a que la convección de los alrededores junto con la olla, le enfriaban muy rápidamente debido a los fuertes vientos. Para lo cual es necesario para futuros experimentos aislar térmicamente el recipiente que se posicione en el foco del colector.

3.5 Conclusiones

Terminados los experimentos se obtuvo que de entre varios tipos de cocinas solares la de tipo parabólica era la adecuada para una cocción rápida y para el calentamiento de agua, caso por el cual no se decidió por un horno solar que a pesar que mantiene muy bien el calor por su diseño se limita solamente a cierto tipo de alimentos. Como se constató en el capítulo 1, incluso en los concentradores parabólicos existen de varios tipos; aún así se decidió por construir uno con geometría paraboloide debido a que se necesitaba obtener las más altas temperaturas sobre un envase que contenía alimentos. Con este diseño se obtuvo una temperatura instantánea de 200°C el 17 de junio sobre la base exterior del envase u olla a las 11am. con un recipiente de volumen máximo de 6 litros aproximadamente.

La importancia de la forma del paraboloide, es decir la razón del por qué se eligió el diámetro de apertura y la distancia al foco de diseño que tienen este proyecto se refina en la construcción. Se parte de que el tamaño del receptor puede ser reducido y por lo tanto, la concentración puede ser incrementada al utilizar un mayor ángulo de borde (Goswami, 2015). En este sentido el receptor, es decir el diámetro de la olla, se debe mantener relativamente grande debido al volumen que debe sostener en su interior en el caso del presente proyecto esa medida fue de 240 mm, por lo que se decidió aumentar la concentración con un mayor ángulo de borde a 60°, pero no se pudo reducir el receptor. Por lo que se considera que el receptor debe ser lo más pequeño posible para reducir las pérdidas de calor, pero lo suficientemente grande para receptar toda la radiación posible.

Por otro lado, el área del colector se reduce a medida que el ángulo de borde también decrece, pero en este caso el sacrificio es válido al utilizar un seguidor mecánico y en un solo eje debido a que la precisión requerida en la eficiencia óptica

es menor en esta reducción. El seguimiento diseñado tiene un giro de norte a sur y además, cuenta con ruedas que le permite desplazarse en cualquier dirección sobre el suelo. Por último, el diseño de la distancia focal en relación al diámetro de apertura fue analizado desde un inicio para que esté fuera de la parábola a una distancia de 690 mm, ya que se debe tomar en cuenta que en una cocina solar la persona que va a cocinar pueda maniobrar la parábola y pueda tener la facilidad de poder extraer o poner el recipiente en el punto focal, para esto la parábola debe estar lo más pegada al piso posible en el diseño fue de aproximadamente 500 mm del piso, pero debe ser posicionada lo suficientemente alta medida desde el piso para poder orientarla hacia el sol. Ahora bien, en el capítulo 2 se obtuvo que la cocina solar obtuvo una eficiencia térmica del 18%, lo cual se puede mejorar aumentando el área de apertura del concentrador manteniendo la misma área del receptor. Por otro lado, se puede intentar con otro material que tenga un valor de reflectividad más alto, como el espejo que llega a valores de 0.94 según se muestra en la Tabla 12.

La implementación de un sistema de inducción sí es factible tomando en cuenta las características mencionadas en este proyecto como el número de vueltas del inductor o bobina de calentamiento, o que se debe mantener libre el área de la base de la olla, por lo que el inductor debe mantener la forma cilíndrica de la olla, es decir un diámetro mayor al de la olla. Las conexiones de la fuente de alimentación del sistema de inducción pueden ir por los tubos que soportan el recipiente, para que así no puedan generar mayor sombra sobre el colector. Y el sistema puede ser apagado y conectado cuando se tenga bajos niveles de radiación directa, o cuando se necesite cocinar en la noche. En la figura 39 que se encuentra en la sección de Anexos se presenta un esquema de cómo el sistema de inducción sobre la olla cumple estas condiciones para que el entorno de la cocina solar no se vea afectado por áreas

innecesarias que afecten la eficiencia térmica del concentrador, al generar sombra que disminuye el valor del factor de forma, además se presenta la manera en que las espiras recubren a la olla para inducir la corriente. Esta proyección puede aportar con 0.046 [kWh] si se requiere el mismo tiempo para elevar la temperatura de 300 ml de leche, según la Tabla 18 en la cocina de inducción automatizada en la cual fue hecha los experimentos de (Martínez-Gómez, Ibarra, Villacis, Cuji, & Cruz, 2015) se obtiene un 18% de mayor eficiencia que la de esta proyección, ya que solo requiere 0.039 [kWh] para la cocción del mismo volumen de leche.

3.6 Recomendaciones

Se indicó en la teoría y se verificó en los experimentos que una cocina solar es totalmente dependiente de la radiación directa del sol. Por lo que cuando la radiación difusa y las condiciones climáticas como la lluvia se imponen, la eficiencia de la cocina solar disminuye dramáticamente, esto aunado a que la convección que sufre el recipiente por los fuertes vientos de verano en Quito hacen que no se pueda conservar totalmente el calor de la cocción por lo que el calor ganado disminuye muy rápidamente. Por lo que se propone para un siguiente proyecto implementar y construir la proyección del sistema de inducción aquí indicado.

Adicional a esto, también se podría efectuar implementaciones a la cocina solar como apoyo al incluir vidrios de aumento direccionados al punto focal tratando de evitar la sombra causada por los objetos sobre el colector, o también la posibilidad de adicionar un lente Fresnel en la base de la olla. Y de esta manera analizar los resultados obtenidos.

Se debería hacer un estudio más minucioso sobre cómo mejorar el recipiente en el receptor ya que al tapar la olla se pudo constatar que la cocción se realizó en un menor tiempo. Para lo cual se debería analizar otros tipos de materiales en las collas como el acero inoxidable, otros tipos de recubrimiento en la base como la pintura negra y el aislamiento térmico como con lana de vidrio.

La importancia de conocer que los alimentos preparados por calentamiento solar son más sanos que unos preparados por combustión debería ser concluida con nuevas investigaciones.

Referencias

- Agencia Espacial Civil Ecuatoriana a la Comunidad. (04 de Mayo de 2013). *División de Ciencias Planetarias*. Obtenido de <http://quito.exa.ec/Current.htm>
- AIHE. (2012). El Petróleo en Cifras. *Asociación de la Industria Hidrocarburífera del Ecuador*, 15.
- ASHRAE. (1975). *Procedure for determining heating and cooling loads for computerizing energy calculations*. Atlanta: ASHRAE.
- ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI). (2013). *ASHRAE Climate design conditions*. Obtenido de <http://ashrae-meteo.info/index.php>
- Baca Urbina, G. (2013). *Evaluación de proyectos* (Séptima ed.). México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Biello, D. (18 de 02 de 2009). *Scientific American*. Obtenido de Sustainability-How to use solar energy at night: <http://www.scientificamerican.com/article/how-to-use-solar-energy-at-night/>
- Bolz, R., & Tuve, G. (1970). *CRC Handbook of Tables for Applied Engineering Science*. Boca Raton: CRC PRESS.
- British Stainless Steel Association. (03 de 05 de 2016). Obtenido de Melting temperature ranges for stainless steels: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=103>
- Butti, K., & Perlin, J. (1980). *A Golden Thread 2500 years of solar architecture and technology*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. México: McGraw-Hill.
- CONELEC. (2008). *ATLAS SOLAR DEL ECUADOR*. Ecuador: Corporación para la Investigación Energética.
- CONELEC. (2013). *Corporación Eléctrica del Ecuador-CELEC*. Obtenido de Plan Maestro de Electrificación pág.42: <https://www.celec.gob.ec/electroguayas/files/vol3.pdf>
- Cooper, P. (1969). The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills. *Solar Energy*, 12(3).
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Electronics Hub. (11 de Agosto de 2015). *Electronics Hub*. Recuperado el 29 de Marzo de 2016, de How to Make Solar Cooker and Its Working: <http://www.electronicshub.org/solar-cooker-information/>
- Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador. (Marzo de 2012). *EP Petroecuador*. Recuperado el Mayo de 2015, de <http://www.eppetroecuador.ec/GerenciaGasNatural/index.htm>
- Goswami, Y. (2015). *Principles of solar engineering* (Tercera ed.). Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, LLC.
- Grupo GH. (2011). *Inducción*. Obtenido de Calentamiento por inducción: <http://www.ghinduction.com/sobre-calentamiento-por-induccion/?lang=es>

- Hunn, B., & Calafell, D. (1977). Determination of average ground reflectivity for solar collectors. *Solar Energy*, 19, 87-89.
- Indoor Air Quality Standard of China (GB/T 18883–2002). (2002). 2(in Chinese).
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2005). *Artículos de uso doméstico ollas de aluminio*. Quito: INEN 2 361:2005.
- Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering: processes and systems*. London: ELSEVIER.
- Kreith, F., & Kreider, J. (1978). *Principles of solar engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Li, Y., He, Y., & Wang, W. (2011). Optimization of solar-powered Stirling heat engine with finite-time thermodynamics. *Renewable Energy*(36), 421-427.
- Löf, G. (1963). Recent Investigations in the Use of Solar Energy for Cooking. *Rapporteur's General Report*, 7(3), 125-133.
- Martínez-Gómez, J., Ibarra, D., Villacis, S., Cuji, P., & Cruz, P. (2015). Analysis of LPG, electric and induction cookers during cooking typical Ecuadorian dishes into the national efficient cooking program. *FOOD POLICY* 59, 88-102.
- Maxwell, J. C. (1902). *Theory of Heat*. London: LONGMANS, GREEN, AND CO.
- McAdams, W. (1954). *Heat Transmission*. New York: McGraw-Hill.
- Ministerio de electricidad y energía renovable. (2013). *Atlas Eólico del Ecuador: con fines de generación eléctrica*. Ecuador: AWS TRUEPOWER.
- National Renewable Energy Laboratory. (02 de Febrero de 2012). *Concentrating solar resource of the United States*. Obtenido de Dynamic maps, GIS Data, & Analysis tools, : <http://www.nrel.gov/gis/solar.html>
- Panchi, A. (2013). *Estudio de la calidad de energía eléctrica por ingreso de cocinas de inducción en la red de distribución en la parroquia de Sanbuenaventura Barrio Centro*. ESPE, Latacunga.
- Parry , N. (2015). *Cantina west parabolic solar burner*. Obtenido de http://www.solarcooker-at-cantinawest.com/parabolic_solar_cooker_solar_burner.html
- Parry, N. (2015). *Solar Cooker at Cantina West*. Obtenido de Cantina West Parabolic Solar Burner: http://www.solarcooker-at-cantinawest.com/parabolic_solar_cooker_solar_burner.html
- Pilloton, E. (02 de 04 de 2008). *Inhabitat*. Obtenido de New solar panels that work at night: <http://inhabitat.com/solar-panels-work-at-night/>
- Quitiaquez Sarzosa, W. G. (2015). *Diagnóstico del consumo de energía eléctrica en el proceso de destilación de agua en los Laboratorios de Ciencias de la Vida Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito*. Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi-Abril.
- Saint-Gobain. (Octubre de 1774). *Espejo ustorio para fundir los metales sin recurrir al fuego*. (Charpentier, Intérprete) Jardin de l'Infante del Louvre, París, Francia.

- Sankhasubhra, D. (04 de 03 de 2003). *Solar cooking*. Recuperado el 15 de 10 de 2015, de The Inclined Box-Type Solar Cooker – A New Design: <http://solarcooking.org/plans/inclined-box-cooker.htm>
- Seifert, D. (Julio de 2009). *Solar cookers international network*. Recuperado el 29 de Abril de 2016, de Gastronomía solar-Cocinas solares: <http://gastronomiasolar.com/cocina-solar-parabolica/>
- TDK Europe. (Abril de 2008). *Energy efficiency in the kitchen*. Obtenido de Components for induction cookers: <http://en.tdk.eu/tdk-en/373562/tech-library/articles/applications---cases/applications---cases/energy-efficiency-in-the-kitchen-/171866>
- Thandar, S., Saldanah, C., & Moe, W. (2008). Design and Construction of Power System for Induction Heating (IH) Cooker Using Resonant Converter. 183-192.
- Villacís, S., Martínez, J., Riofrío, A., Carrión, D., Orozco, M., & Vaca, D. (2015). Energy efficiency analysis of different materials for cookware commonly used in induction cookers. *Energy Procedia*(75), 925-930.
- World Energy Outlook. (2010). *World Development Indicators: Electricity production, sources, and access*. The World Bank Group, Ecuador.

Anexos

Construcción de la parábola

Anillo base para soporte de moldes



Figura 27. Unión para el anillo base

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Platinas curvas para soportar los moldes



Figura 28. Soldadura platinas curvas

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Corte de molde desde una matriz



Figura 29. Corte del molde con cizalla

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Estructura del paraboloide



Figura 30. Colocación y unión de los moldes a la estructura

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Mesa de soporte paraboloide



Figura 31. Soldadura de mesa soporte

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Paraboloide soldado con los moldes

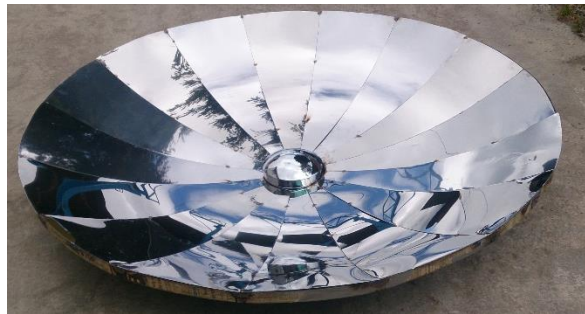


Figura 32. Paraboloide final

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Prototipo final



Figura 33. Cocina parabólica

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Experimento 1 y 2



Figura 34. Lectura del pH y calentamiento de agua

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Experimento 3



Figura 35. Cocción de canguil

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Experimento 4



Figura 36. Cocción de papas con las temperaturas antes y después de freír

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Experimento 5



Figura 37. Al freír corvina y la temperatura final

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Cocción final de un plato típico



Figura 38. Plato típico ecuatoriano en una cocina solar parabólica

Elaborado por: B. Paredes (2016)

Esquema de proyección de inducción sobre la olla

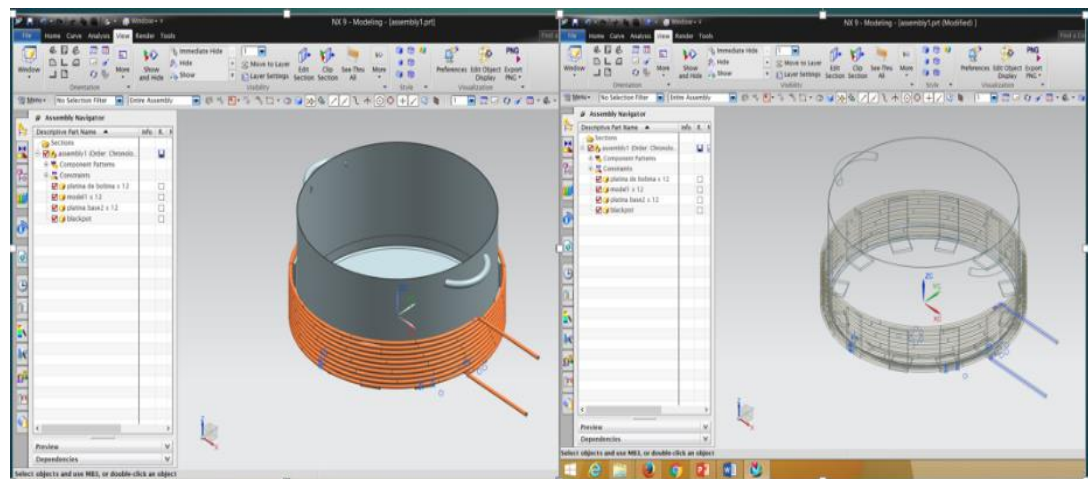


Figura 39. Implementación de los elementos de inducción sobre la olla
Elaborado por: B. Paredes (2016)

Manual de operación de la cocina solar tipo parabólica

Precauciones

- Tener a la mano el equipo de protección contra quemaduras por radiación., esto es gafas con filtro negro y un par de guantes, para el momento de cocinar.
- Para obtener los resultados esperados, y que se incluyen en este estudio. La cocina debe ser operada desde las 10:00 am. hasta las 14:00 pm.

Procedimiento

- Verificar que los frenos de las ruedas estén en posición de desplazamiento, luego trasladar la cocina, manteniendo las manos juntas sobre cualquier refuerzo interior superior ubicado en los tres lados de la estructura de la cocina solar.
- Buscar un lugar donde ningún tipo de edificación pudiese estorbar la entrada directa de los rayos del Sol.
- Una vez en el lugar, colocar la olla con su respectiva cadena incluyendo los alimentos que se desee cocinar, ajustar con firmeza el perno que une la argolla con la cadena que soporta la olla. Para mayor comodidad se puede girar la parábola según se desee.
- Llevar la olla hasta el centro donde convergen los dos tubos soporte.
- Orientar el paraboloide en la posición según el ángulo de altitud en que el Sol se encuentra en determinada hora. Esto se lo puede efectuar al verificar que la imagen reflejada de los rayos del sol visualmente se encuentren sobre la base de olla. Si se desea comprobar, pasar por un par de segundos la mano sobre la

base de la olla; el calor de concentración se sentirá instantáneamente sobre la mano.

- Esperar que los alimentos se cocinen y verificar esporádicamente el avance de cocción para obtener el mejor resultado.
- Al tener cocinado el alimento, para desmontar la olla del centro de los tubos, orientar el paraboloide al lado contrario de la dirección del sol y así tener la comodidad de entrar y retirar el recipiente sin ningún tipo de peligro.
- Si se desea cocinar otros alimentos repetir el mismo procedimiento.

Manual de mantenimiento

- Puede ocurrir que al freír cierto tipo de alimentos y al utilizar fluidos como el aceite este tienda a manchar el paraboloide. Para estos casos. Lo único que hay que hacer es utilizar jabón líquido para quitar grasa de cocina, utilizando un paño o papel absorbente de cocina. Se puede lavar normalmente con agua sin que afecte al material, y además se tiene el anillo base donde existe el espacio suficiente para que no se pose el agua y pueda fluir libremente hacia el suelo.
- No se recomienda el pulir el paraboloide ya que se pierde el brillo de fábrica que posee el material.